

# **Technická univerzita v Liberci**

fakulta strojní

katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program:

strojírenská technologie

Zaměření:

obrábění a montáž

## **Analýza vlivu ekologických procesních kapalin od firmy PARAMO, a.s. na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli**

## **Analysis of the environmental impact of process fluids from the PARAMO, a.s. on the tool life and surface roughness during turning stainless steel**

**KOM - 1201**

*Jan Paliculin*

Vedoucí práce: Prof. Ing. Alexey Popov, DrSc - TUL

Konzultanti: Ing. Miloslav Ledvina

Počet stran: 74

Počet obrázků: 45

Počet tabulek: 10

Počet grafů: 4

16.12.2012



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení : **Jan P A L I C U L I N**  
Studijní program : B2341 Strojírenství  
Obor : 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření : Obrábění a montáž

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Analýza vlivu ekologických procesních kapalin od firmy PARAMO, a. s. na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli**

Zásady pro vypracování :

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Shrnutí poznatků o trvanlivosti nástroje při třískovém obrábění, charakteristiky otupení břitu obráběcího nástroje, Taylorův vztah.
2. Analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje při třískovém obrábění, klasifikace procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin.
3. Shrnutí poznatků o integritě povrchu po obrábění. Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu.
4. Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu při soustružení nerezové oceli v laboratoři KOM FS TUL.
5. Porovnávání vlivu ekologických procesních kapalin na trvanlivost VBD a drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli v laboratoři KOM FS TUL.
6. Analýza laboratorních výsledků; vyvození závěrů.



Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva : cca 30 stran textu
- grafické práce : obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu) :

1. MÁDL, J. Řezné kapaliny v současné technologii obrábění. In: *Sborník vědeckých prací*. 1. vyd. Ekologie obrábění, Strojírenská technologie knihovnička, 2000, s. 9 - 18. ISBN 80-7044-232-8.
2. JERSÁK, J., REJZEK, M. Účinek procesní kapaliny na proces soustružení a vybrané parametry integrity povrchu. *Strojírenská technologie*. Rec. prof. Vasilko, prof. Holešovský. roč. 16, duben 2011, č. 2. s. 17 - 23. ISSN 1211-4162.
3. ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
4. SANDVIK Coromant, Sandviken: *Technická příručka obrábění – soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2005. 601 s.
5. HOLEŠOVSKÝ, F., DUŠÁK, K., JERSÁK, J., aj. *Terminologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2005. 208 s. ISBN 80- 7044-616-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Miloslav Ledvina

  
Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.  
vedoucí katedry



  
Doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci, dne 6.11.2012

**Analýza vlivu ekologických procesních kapalin od firmy PARAMO,a.s.  
na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení nerezové  
oceli**

*ANOTACE:*

V bakalářské práci jsou hodnoceny vlivy jednotlivých druhů procesních kapalin na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli. V rámci řešení byla určena metodika měření vlivů procesních kapalin na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení. V laboratořích katedry obrábění a montáže TUL bylo odzkoušeno pět vodou mísitelných ekologických procesních kapalin od firmy PARAMO,a.s.

Úkolem této práce bylo určení procesní kapaliny s prokazatelně nejlepším vlivem na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení. V práci jsou dále sjednoceny dostupné informace o trvanlivosti a otupení nástroje, procesních kapalinách a integritě povrchu.

**Klíčová slova:** soustružení, trvanlivost nástroje, opotřebení nástroje, drsnost povrchu, integrita povrchu, procesní kapalina.



# **Analysis of the environmental impact of process fluids from the PARAMO, a.s. on the tool life and surface roughness during turning stainless steel**

## *ANNOTATION:*

This bachelor thesis provides the evaluation of impacts of various types of cutting fluids on tool life and surface roughness during stainless steel turning. Research methodology of measuring effects of process fluids on tool life and surface roughness when turning stainless steel was specified as a part of solution. Five water-miscible ecological cutting fluids from PARAMO company were tested in the laboratories of TUL.

The objective of this study was to choose the process fluid which proved to have the best influence on tool life and surface roughness when turning stainless steel. This thesis also unifies available information on durability and blunting of tools, process fluids and surface roughness.

**Keywords:** turning, tool life, tool wear, surface roughness, surface integrity, cutting fluid

Zpracovatel: TU, FS v Liberci, KOM

Dokončeno: 2012

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 74

Počet obrázků: 45

Počet tabulek: 10

Počet grafů: 4

## ***MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ***

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultantů.

V Liberci, 16.12.2012

Podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych zde vyjádřil poděkování panu Prof. Ing. Alexeyovi Popovovi, DrSc za odborné vedení práce, podnětné rady a připomínky pro vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji konzultantovi bakalářské práce panu Ing. Miloslavu Ledvinovi za poskytnutou pomoc a asistenci při měření. Též děkuji panu Ing. Jiřímu Karáskovi za pomoc v laboratoři metrologie a panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za pomoc a důležité rady při sestavování CNC programu pro soustruh CHEVALIER FCL-2140.

Velmi rád bych zde také poděkoval své rodině a blízkým, kteří mě při mém studijním úsilí pomáhali a podporovali.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60-školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultanty.

Datum: 16.12.2012

Podpis:

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ.....	9
ÚVOD.....	10
1. SHRUTÍ POZNATKŮ O TRVANLIVOSTI NÁSTROJE PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ, DÉLKOVÉ CHARAKTERISTIKY OTUPENÍ BŘITU OBRÁBĚCÍHO NÁSTROJE, TAYLORŮV VZTAH.....	11
1.1 Trvanlivost nástroje.....	11
1.2 Fyzikální podstata opotřebení břitu nástroje.....	13
1.3 Druhy opotřebení břitu nástroje.....	15
1.3.1 Opotřebení hřbetu břitu.....	16
1.3.2 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele.....	16
1.3.3 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu.....	17
1.3.4 Vydrolení ostří.....	17
1.3.5 Vznik hřebenových trhlinek.....	18
1.3.6 Plastická deformace břitu.....	18
1.3.7 Tvorba nárůstků.....	19
1.3.8 Únavový lom.....	19
1.3.9 Lom břitu.....	20
1.4 Délkové charakteristiky otupení břitu obráběcího nástroje.....	21
1.5 Taylorův vztah.....	23
2. ANALÝZA VLIVU PROCESNÍCH KAPALIN NA TRVANLIVOST NÁSTROJE PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ, KLASIFIKACE PROCESNÍCH KAPALIN PRO OBRÁBĚNÍ, VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKY PROCESNÍCH KAPALIN.....	27
2.1 Analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivosti nástroje Při třískovém obrábění.....	27
2.2 Klasifikace procesních kapalin pro obrábění.....	28
2.2.1 Vodní roztoky.....	28
2.2.2 Emulzní kapaliny.....	29
2.2.3 Mastné oleje.....	29
2.2.4 Minerální oleje.....	29
2.2.5 Zušlechťené řezné oleje.....	29
2.2.6 Syntetické a polosyntetické řezné kapaliny.....	31
2.3 Vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin.....	32
2.4 Přívod procesní kapaliny do místa řezu.....	36
3. SHRUTÍ POZNATKŮ O INTEGRITĚ POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ DEFINICE POJMU DRSNOST POVRCHU, METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.....	41
3.1 Shrnutí poznatků o integritě povrchu po obrábění.....	41
3.2 Definice pojmu drsnost povrchu.....	43
3.3 Metody měření drsnosti povrchu.....	44
3.3.1 Metoda kvalitativní.....	44

3.3.2	Metoda kvantitativní.....	45
4.	NAVRŽENÍ METODIKY ZKOUMÁNÍ TRVANLIVOSTI NÁSTROJE A DRSNOSTI POVRCHU PŘI SOUSTRUŽENÍ NEREZOVÉ OCELI V LABORATOŘI KOM FS TUL.....	49
4.1	Popis použitých přístrojů, nástrojů a měřících zařízení.....	49
4.2	Charakteristika obráběného materiálu.....	52
4.3	Procesní kapaliny.....	54
4.4	Metodika zkoumání trvanlivosti nástroje při soustružení nerezové oceli na CNC soustruhu CHEVALIER FCL – 2140.....	55
4.4.1	Příprava měření.....	55
4.4.2	Postup měření trvanlivosti břitů nástroje.....	58
4.5	Metodika zkoumání drsnosti povrchu při soustružení nerezové oceli na univerzálním soustruhu SU-50.....	61
4.5.1	Příprava měření.....	61
4.5.2	Postup měření drsnosti obrobeneé plochy.....	61
5.	POROVNÁNÍ Vlivu EKOLOGICKÝCH PROCESNÍCH KAPALIN NA TRVANLIVOST VBD A DRSNOST POVRCHU PŘI SOUSTRUŽENÍ NEREZOVÉ OCELI V LABORATOŘI KOM FS TUL.....	63
5.1	Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na trvanlivost VBD při soustružení nerezové oceli.....	63
5.2	Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli.....	65
5.2.1	Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu z hlediska střední aritmetické úchyly – Ra.....	65
5.2.2	Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu z hlediska vzdálenosti mezi 5-ti nejvyššími a nejnižšími body profilu – Rz.....	67
5.2.3	Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na podíl nosného profilu $C_{TP50}$ .....	68
6.	ANALÝZA LABORATORNÍCH VÝSLEDKŮ; VYVOZENÍ ZÁVĚRŮ.....	70



## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

KOM	[-]	katedra obrábění a montáže
TUL	[-]	Technická univerzita v Liberci
ČSN	[-]	česká technická norma (česká soustava norem)
DIN	[-]	německá národní norma
ISO	[-]	mezinárodní norma
pH	[-]	záporný logaritmus koncentrace vodíkových iontů
CO <sub>2</sub>	[-]	chemická zkratka pro oxid uhličitý
VB	[mm]	velikost opotřebení hřbetu nástroje
T	[min]	trvanlivost nástroje
v	[m/min]	řezná rychlost
a <sub>p</sub>	[mm]	hloubka záběru
f	[mm/ot]	rychlost posuvu
SK	[-]	slinutý karbid
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	výška nerovnosti profilu určená z 5 (10) bodů
Ctp50	[μm]	hloubka, ve které je podíl materiálu a vzduchu 1:1
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
CNC	[-]	počítačem číslicově řízený (Computer Numeric Control)
MQL	[-]	chlazení řeznou mlhou (Minimal Quantity Lubrication)

## ÚVOD

Procesní kapaliny používané při obrábění kovových materiálu formou třískového obrábění odvádějí teplo z místa řezu, snižují třecí odpor, odplavují třísky a slouží ke zvýšení trvanlivosti nástroje a ke zlepšení jakosti obráběného povrchu. Dnes jsou na trhu k dostání v mnoha druzích, jejich rozlišení a následná volba není snadná.

V dnešní době je trendem nejen snižování výrobních nákladů ale i míra dopadu procesu obrábění na životní prostředí. Z toho důvodu jsou dnes vyvíjeny takové procesní kapaliny, které po svém použití a skončení životnosti budou snadno a ekologicky odbouratelné. Proto společnost PARAMO, a.s. vyvinula nové ekologické procesní kapaliny, které byly objektem zkoumání této bakalářské práce.

Tato práce má za úkol stanovit metodiku měření a analýzy vlivu jednotlivých procesních kapalin, které firma PARAMO vyvinula, na trvanlivost nástroje a drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli. Dále shrnuje dostupné informace o trvanlivosti nástroje, otupení břitu, procesních kapalinách, integritě a drsnosti povrchu.

Vyhodnocování jednotlivých vlivů proběhlo v laboratořích katedry obrábění a montáže, kde se zkoumalo výsledné otupení břitu a drsnost obrobené plochy. Jako materiál pro hodnocení vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje byla použita nerezová ocel ČSN 17 481 a pro hodnocení vlivu na drsnost povrchu nerezová ocel ČSN 17 240. Firma PARAMO k výzkumu poskytla 5 procesních kapalin

Výsledkem provedených experimentů a měření bylo určení procesní kapaliny, které má prokazatelný vliv na zlepšení trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu při soustružení nerezové oceli.

# 1. SHRUTÍ POZNATKŮ O TRVANLIVOSTI NÁSTROJE PŘI TRÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ, DÉLKOVÉ CHARAKTERISTIKY OTUPENÍ BŘITU OBRÁBĚCÍHO NÁSTROJE, TAYLORŮV VZTAH.

## 1.1 Trvanlivost nástroje

**Trvanlivost nástroje** - Pod pojmem trvanlivost nástroje se rozumí součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění až po dosažení mezní hodnoty vybraného kritéria opotřebení. Hodnota a kritérium opotřebení musí být stanoveny takovým způsobem, aby obrobek dosahoval požadovaných rozměrů, tvaru a kvality povrchu po celou dobu trvanlivosti nástroje.

**Životnost nástroje** – Je úzce spjata s trvanlivostí nástroje. Životností nástroje se rozumí součet všech jeho trvanlivostí neboli celková doba používání nástroje, která začíná uvedením nástroje do činnosti a končí jeho vyřazením.

U nástrojů, které lze přebušovat končí životnost po odbroušení celé jeho funkční části. U vyměnitelných břitových destiček je životnost ukončena pokud dojde k meznímu opotřebení všech jejich břitů.

Životnost přebušovaného nástroje lze vyjádřit vztahem:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x + 1) \times T \quad [min]$$

kde:  $T_i$  [min] – jednotlivé trvanlivosti

$T$  [min] – aritmetický průměr hodnot  $T_i$

$x$  [-] – počet možných ostření nástroje

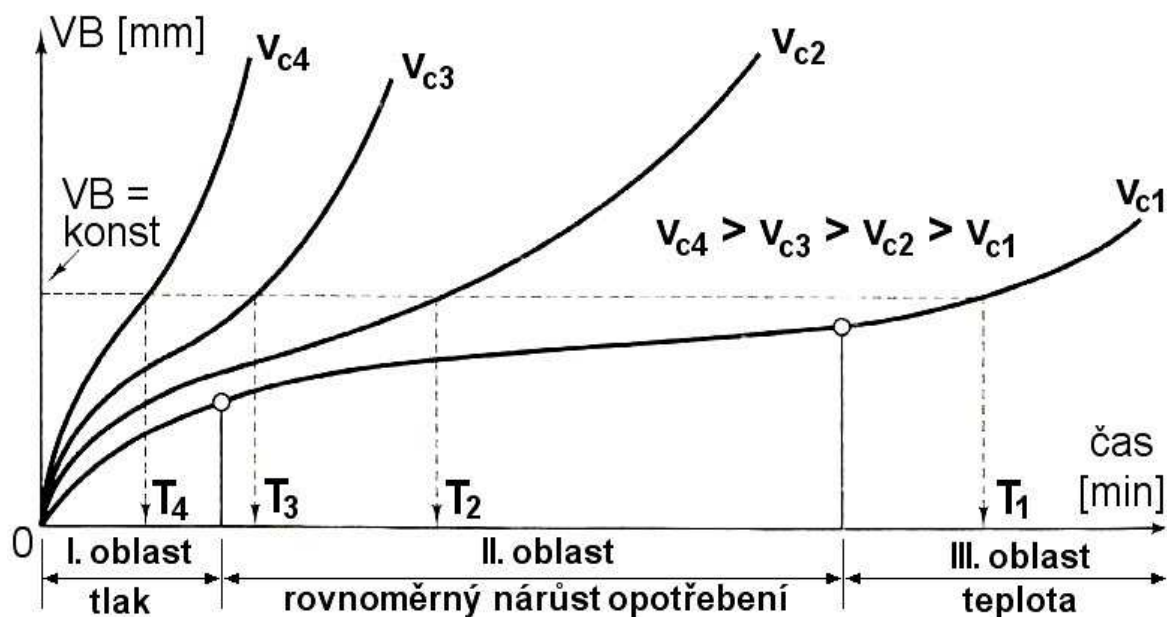
Životnost nástroje s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se stanoví podle vztahu:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \times T \quad [min]$$

kde:  $T_i$  [min] – trvanlivost jednotlivých ostří destičky

$T$  [min] – aritmetický průměr hodnot  $T_i$

$q$  [-] – počet použitelných ostří destičky



Obr. 1 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti

Oblast I. Nástroj se ze začátku otupuje velmi rychle, což je způsobeno vlivem nerovností stykových ploch. Typická vlastnost nově naostřených nástrojů.

Oblast II. Stykové plochy jsou vyhlazené, otupování probíhá rovnoměrněji a pomaleji, nástroj drží míru.

Oblast III. Po dosažení meze otupení se intenzita otupení zvětšuje a končí lavinovitým otěrem během krátké doby, následkem toho dochází k poškození nástroje a okamžité ukončení jeho trvanlivosti.

Trvanlivost bříty nástroje je ovlivněna řadou faktorů, mezi které patří:

- Druh obráběného materiálu
- Druh a chemické složení řezného materiálu
- Řezné podmínky – řezná rychlost, posuv, hloubka záběru
- Procesní prostředí a způsob chlazení
- Geometrie, rozměry a tvar nástroje
- Způsob namáhání nástroje
- Tuhost celé obráběcí soustavy

## 1.2 Fyzikální podstata opotřebení bříty nástroje

Průběh opotřebení ovlivňuje mnoho rozdílných fyzikálně-chemických faktorů. K základním mechanismům opotřebení patří zejména:

- Abraze
- Adheze
- Plastická deformace
- Křehký lom
- Difúze
- Oxidace

**Abraze** – Dochází k brusnému otěru vlivem uvolněných tvrdých částic z obrobku a nástroje. Schopnost bříty odolávat abrazivnímu otěru je z větší části dána jeho tvrdostí. Nástrojový materiál s velkou hustotou tvrdých částic sice dobře odolává abrazivnímu otěru, avšak stejně dobře nemusí odolávat jiným mechanismům opotřebení.

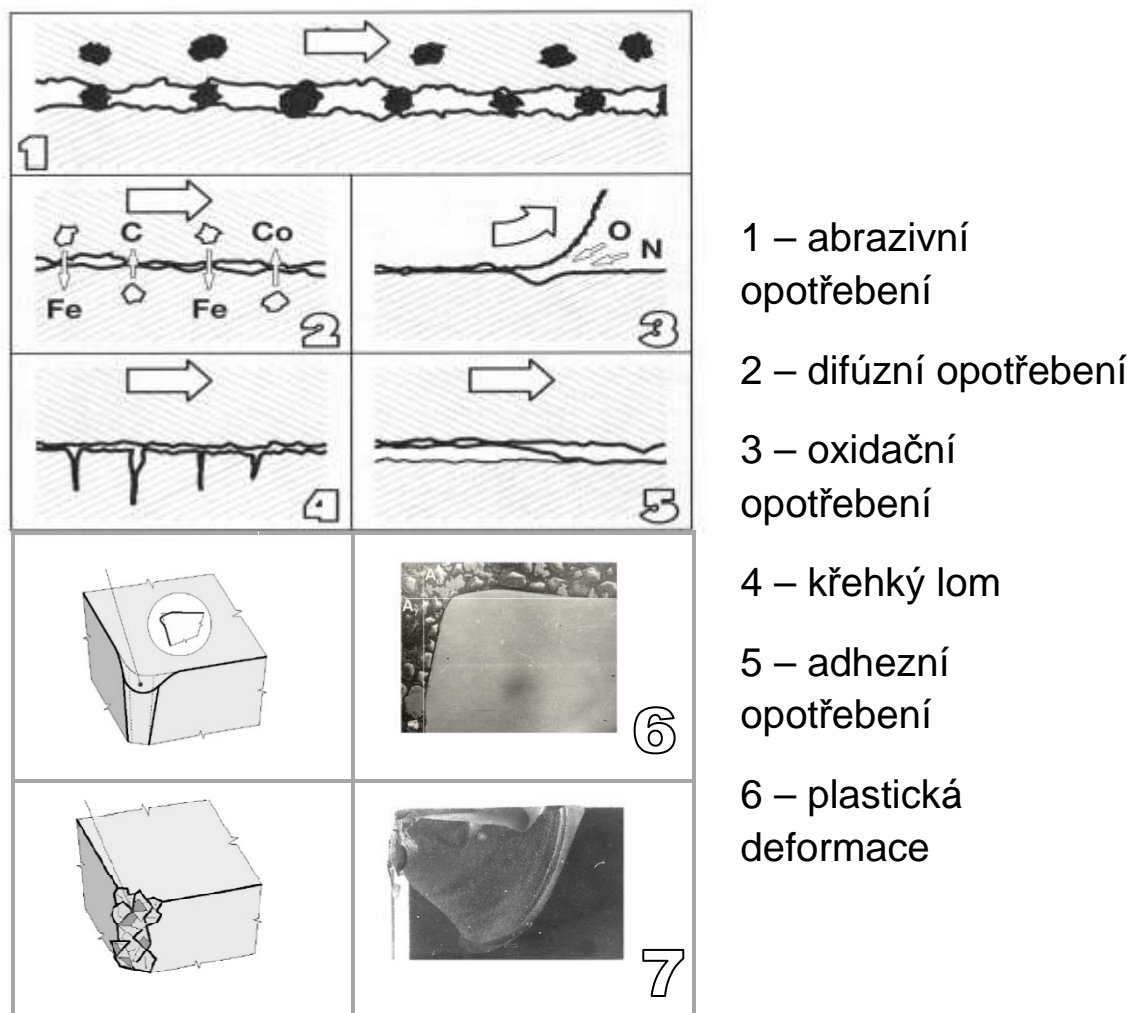
**Adheze** – Má za následek vznik a okamžité porušování mikrosvarových spojů (nárůstků) na stýkajících se nerovnostech čela a odcházející třísky. Vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků, podobného chemického složení materiálů a kovově čistých stýkajících se povrchů.

**Difúze** – Během difúze dochází k přeskupování atomů z nástrojového do obráběného materiálu a naopak. Následkem tohoto děje dochází k vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje. Difúze je nejvíce ovlivněna teplotou řezání, chemickými vlastnostmi nástrojového materiálu a jeho afinitě vůči materiálu obrobku.

**Oxidace** – Vlivem rozptýleného kyslíku v okolním prostředí dochází na povrchu nástroje k tvorbě chemických sloučenin

**Křehký lom** – K lomu dochází v důsledku velkého mechanického zatížení, projevuje se u přerušovaného řezu, nebo pokud je materiál nehomogenní a obsahuje vměstky.

**Plastická deformace** – Může se projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení. Vzniká vlivem vysokého tepelného a mechanického zatížení kumulovaného v čase.



Obr. 2 Hlavní mechanismy opotřebení břitů nástrojů [2]

Abraze a adheze se též často setkávají s označením jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické. V rámci času působí všechny čtyři plynule, avšak časový okamžik začátku jejich působení nemusí mít vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naopak mechanismy, které v daném okamžiku působí náhle. Jejich přítomnost obvykle znamená okamžité ukončení činnosti nástroje.

Hřbet nástroje podléhá opotřebení především vlivem abraze a oxidace, zatímco čelo se opotřebovává vlivem adheze, abraze, difúze a oxidace. K určení, která část břitů se bude opotřebovávat více (hřbet, čelo, popř. špičky) by bylo nutné



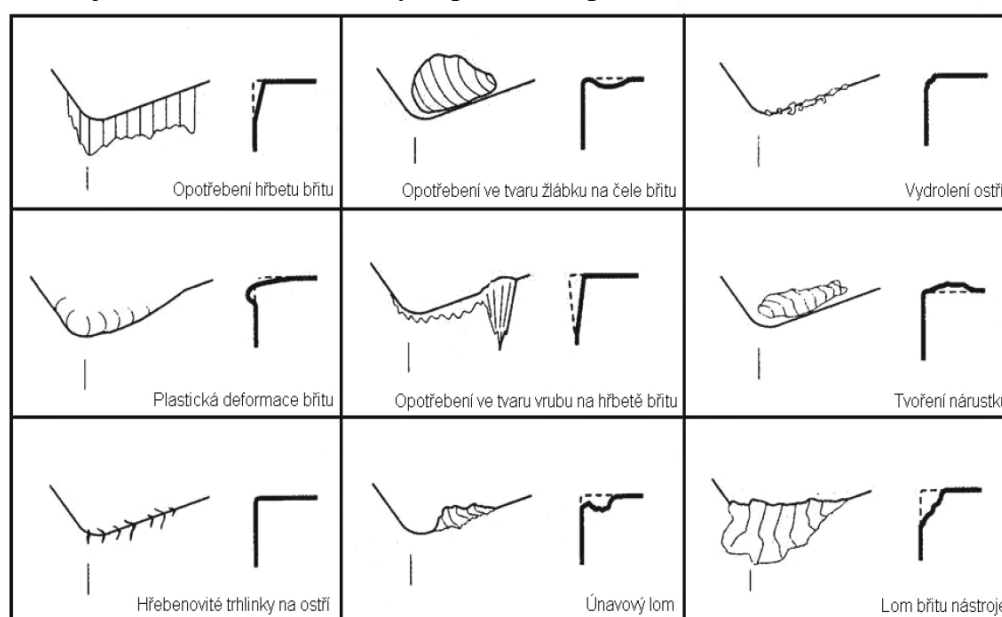
znát i další faktory obrábění. Mezi které zejména patří geometrie nástroje, druh operace (hrubovací, dokončovací) a řezné podmínky jako je řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení.

Mimo výše jmenovaných základních mechanismů opotřebení se v odborné literatuře můžeme ještě setkat s dalšími opotřebeními, jako jsou:

- Mechanická únava
- Tepelná únava - vytváření hřebenovitých trhlin na čele a hřbetu
- Delaminační opotřebení - odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje, zejména u povlakovaných SK
- Termoelektrické opotřebení - odstraňování elektricky vodivého materiálu z povrchu nástroje
- Rozpouštění nástrojového materiálu - v bodech na povrchu nástroje
- Elektrochemické opotřebení - výměna iontů mezi materiálem nástroje a obrobku[1]

### 1.3 Druhy opotřebení bříty nástroje

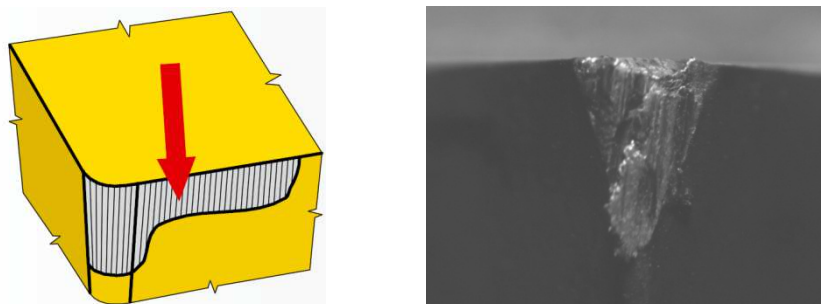
Pro posouzení trvanlivosti, její spolehlivosti a možnosti jejího prodloužení je potřeba znát místa a velikosti opotřebení bříty. Každý obráběcí proces má svůj optimální průběh opotřebení, který je podmíněn volbou správného nástroje, řezných podmínek, jakosti materiálu a dobrých podmínek pro obrábění.



Tab. 1 Délkové charakteristiky otupení bříty [3]

### 1.3.1 Opotřebení hřbetu bříty

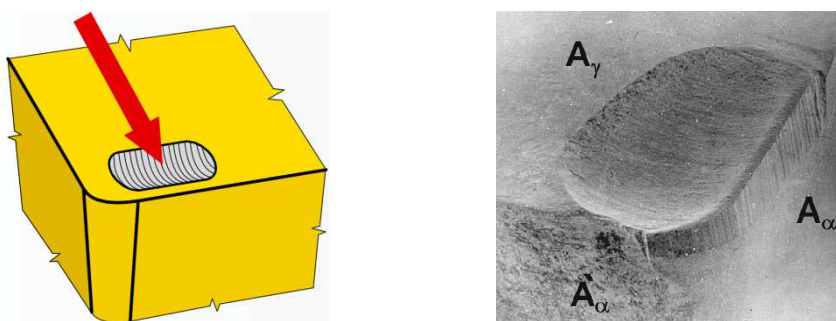
Všeobecně obvyklý typ opotřebení. Patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše bříty, kde dochází k úbytku materiálu. Plochy hřbetu u hlavního a vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní fasetce jsou před, během i po utváření třísky vystaveny vlivu materiálu obrobku. Obvyklá představa ideálního průběhu opotřebení je taková, že se břit postupně a stejnoměrně otupuje. Příliš velké opotřebení má za následek změnu geometrie bříty, která způsobí zhoršení jakosti povrchu obrobku, nepřesnost rozměrů a zvětšování tření v místě řezu.



Obr. 3 Opotřebení hřbetu bříty [4]

### 1.3.2 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele

Vzniká následkem působení abraze a difúzního opotřebení. Žlábek vzniká jednak působením brousícího efektu vyvolaného abrazí, kdy dochází k úběru materiálu nástroje, tak i difúzí materiálů v místě řezu, kde je nejvyšší teplota. Příliš velké opotřebení v podobě žlábků způsobí změnu geometrie bříty a ovlivní tak obráběcí proces. Vede k celkovému zeslabení bříty, změně směru působení řezných sil a změně tvaru třísky. Vznik toho typu opotřebení se dá omezit volbou vhodných materiálů nástroje a obrobku, které budou mít malou afinitu vůči sobě a dobrou tvrdost za tepla.

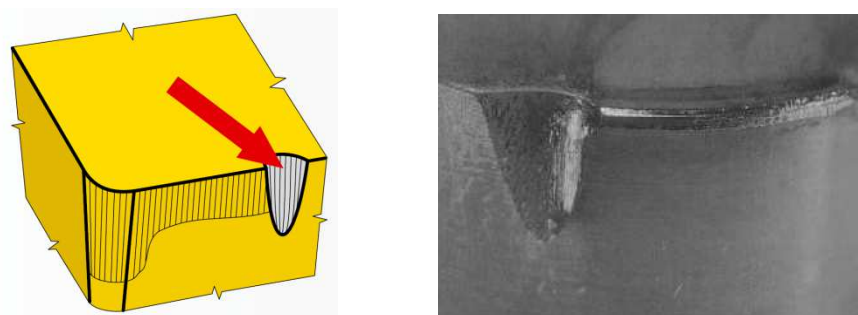


Obr. 4 Opotřebení ve tvaru žlábků [4][6]

### 1.3.3 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu

Řadí se mezi obvyklé adhezní opotřebení. K jeho vzniku může ale dojít i oxidačním opotřebením. Vruby vznikají v místě, kde se břit nástroje stýká s bokem třísky. Toto opotřebení je vymezeno místem, kde proniká vzduch do oblasti obrábění.

K opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetu nástroje dochází vlivem mechanických příčin, přesněji tvrdých částic, které obsahuje materiál obrobku. Příliš velké opotřebení ovlivní utváření třísky a může vést až k lomu a destrukci destičky.



Obr. 5 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu[4][3]

### 1.3.4 Vydrolení ostří

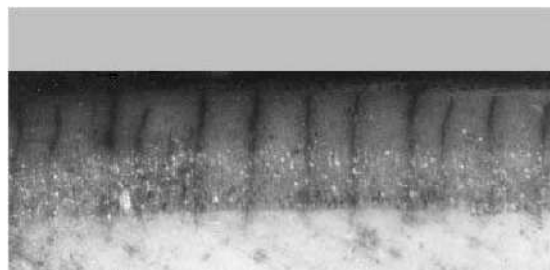
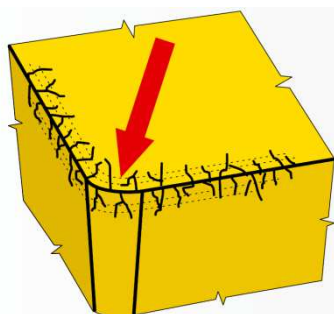
Vydrolování ostří je způsobeno vlivem špiček zatížení, jež mají za následek oddělování drobných částeczek z povrchu břitu. V průběhu opotřebení dochází k odlupování materiálu nástroje a tvorbě trhlinek, které může vést až k lomu břitu. K tomuto typu opotřebení nejčastěji dochází u přerušovaného řezu, popřípadě může být způsobeno nevhodnou volbou ostří nebo nástrojového materiálu.



Obr. 6 Opotřebení formou vydrolení ostří [4][5]

### 1.3.5 Vznik hřebenových trhlinek

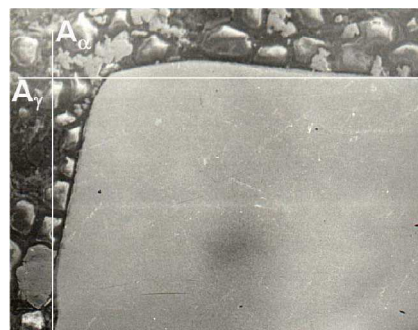
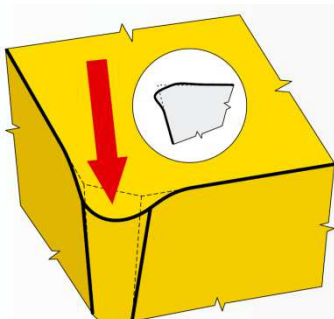
Hřebenové trhlinky vznikají na ostří nástroje vlivem únavového opotřebení, ke kterému dojde při tepelném šoku. Toto opotřebení se projevuje zejména u frézování, jelikož břit při obrábění není stále v řezu a dochází tak k tepelným šokům nástroje. Používání procesních kapalin tedy není vždy vhodnou volbou, jelikož ještě více zvyšují rozdíly teplot při řezu a výstupu z něj.



Obr. 7 Vznik hřebenových trhlinek[4][6]

### 1.3.6 Plastická deformace břitu

Vznik plastické deformace je způsoben vysokými teplotami a tlaky na břit. Rozhodujícím faktorem vzniku tohoto opotřebení je tvrdost za tepla. Pokud dojde k plastické deformaci (vyboulení břitu) změní se geometrie nástroje, odchod třísky a zvýší se teplota v místě řezu. Následkem toho může velice rychle dojít k dosažení kritické hodnoty trvanlivost břitu. Opotřebení tohoto typu se dá zmenšit volbou vhodného řezného materiálu s vyšší otěruvzdorností, správnou geometrií a správným zaoblením ostří.

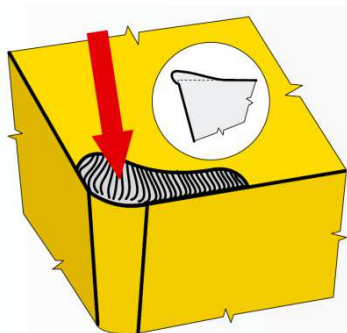


Obr. 8 Plastická deformace břitu [4][6]

### 1.3.7 Tvorba nárůstků

K tvorbě nárůstků může docházet vlivem působení nízkých teplot a řezných rychlostí při obrábění, kdy dojde ke svaření materiálů. Další faktorem ovlivňující vznik nárůstků může být odlupování vrstev v místě břitu nebo jinými formami opotřebení. Rozhodující roli při tvorbě nárůstku hraje afinita materiálu břitu k obrobku. Důsledkem tvorby nárůstku je změna geometrie nástroje, zhoršení jakosti obráběného povrchu a při velkém opotřebení může dojít až k lomu a destrukci destičky.

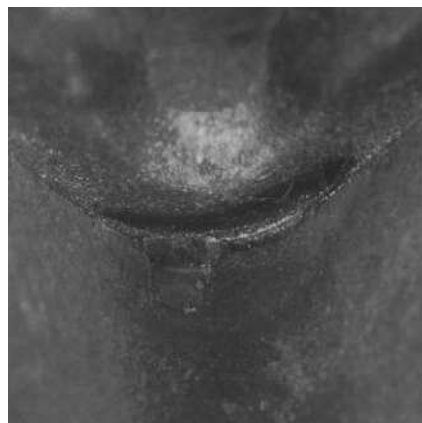
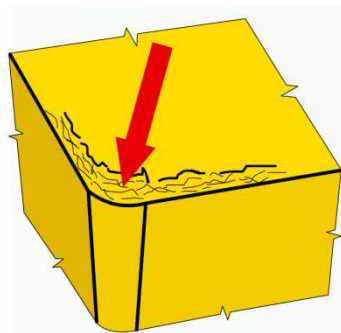
Moderní řezné materiály nemají při správném použití sklony k tvoření nárůstku.



Obr. 9 Tvorba nárůstků[4][3]

### 1.3.8 Únavový lom

Vzniká vlivem součtu měnících se různých zatížení, kdy dochází k velkým změnám velikostí řezných sil. Břit nemusí unést změny velikosti a směru řezné síly a může dojít k lomu nástroje. Plochy lomu jsou souběžné s ostřím nástroje.



Obr. 10 Únavový lom [4][3]

### 1.3.9 Lom břitu nástroje

Křehký lom může být způsoben řadou faktorů. Obvyklý problém je, že materiál nástroje není dostatečně houževnatý na to, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění. Lom břitu představuje ukončení funkčnosti nástroje a v každém případě konec trvanlivosti břitu. K totálnímu lomu nesmí nikdy dojít a musí se mu za každou cenu bránit, aby nedošlo k poškození obrobku. [12]

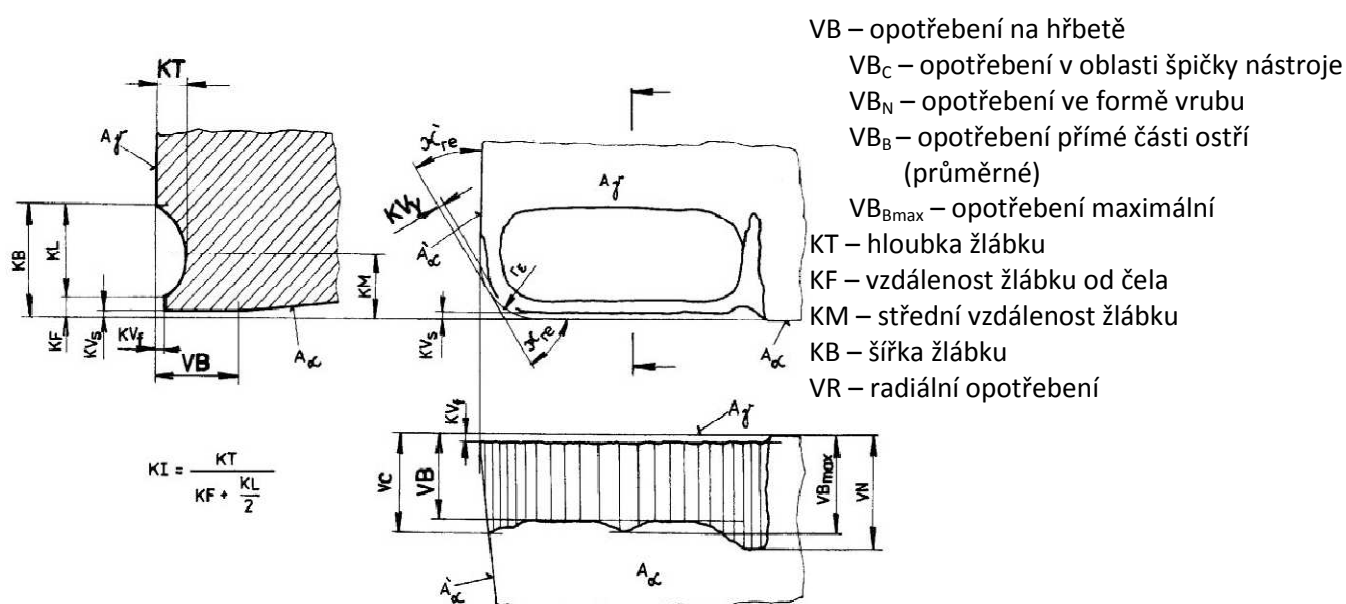


Obr. 11 Lom břitu nástroje [3]



## 1.4 Délkové charakteristiky otupení bříty obráběcího nástroje

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou zobrazena na Obr. 12. Nejčastěji se používají kritéria, VB – šířka opotřebení fazetky na hřbetu nástroje, KT – hloubka výmolu na čele,  $KV_y$  – radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny. Kritérium  $KV_y$  hraje významnou roli u dokončovacích operacích, protože způsobuje změnu rozměru obrobenej plochy. Značení jednotlivých kritérií seliš od normy ČSN ISO 3685, která označuje kritéria opotřebení na hřbetu nástroje  $VB_c$  (VC na obrázku),  $VB_B$  (VB),  $VB_{Bmax}$  ( $VB_{max}$ ) a  $VB_N$  (VN).



Obr. 12 Schéma délkových charakteristik otupení bříty nástroje dle ISO 3685 [9]

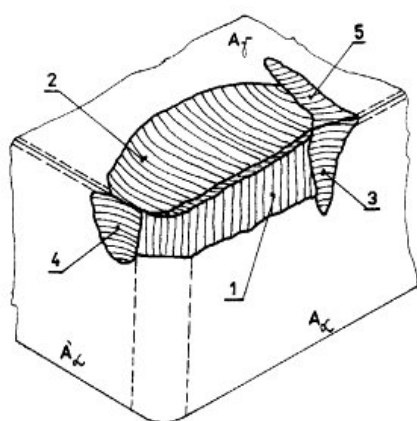
Doporučené hodnoty opotřebení kritéria VB obvykle leží v rozsahu  $0,2 \div 0,8$  mm. Průběh jeho opotřebení je uveden na Obr. 1, konkrétně křivka  $v_{c1}$ ).

Průběh hloubky výmolů na čele KT má tvar exponenciální křivky. Jeho hodnoty obvykle leží v rozsahu  $0,2 \div 0,3$  mm. V praxi se pro výpočet limitní hodnoty při soustružení počítá podle vztahu:

$$KT = 0,06 + 0,3f \quad [mm]$$

kde:  $f$  [mm] – hodnota posuvu na otáčku

Dalším důležitým kritériem opotřebení je prolomení výmolů na čele (2) do vedlejšího ostří v oblasti sekundární hřbetní rýhy (4) viz. obr. 13. Toto kritérium je rozhodující z hlediska struktury obrobeneho povrchu, protože významně zhoršuje parametr drsnosti povrchu.



- 1 – fazetka opotřebení na hřbetě
- 2 – výmol na čele
- 3 – primární hřbetní rýha
- 4 – sekundární (oxidační) hřbetní rýha
- 5 – rýha na čele

Obr. 13 Forma opotřebení bříty nástroje ze slinutého karbidu

## 1.5 Taylorův vztah

Na trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, má největší vliv zvolená metoda obrábění, vlastnosti materiálu nástroje a obrobku a řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, procesní prostředí). Z řezných podmínek má největší vliv na trvanlivost právě řezná rychlost, proto byl odvozen základní vztah, který určuje vzájemnou závislost těchto dvou veličin. Na tomto základním vztahu jsou dnes založeny normy ČSN ISO 3685, ČSN ISO 8688-1 A ČSN ISO 8688-2, znám též jako „T- $v_c$  závislost“ nebo „Taylorův vztah“, který se užívá ve tvaru:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}]$$

Taylorův vzorec 1.

kde:  $C_T[-]$  – konstanta Taylorova vztahu

$v_c[\text{m} \times \text{min}^{-1}]$  – řezná rychlost

$m [-]$  – exponent Taylorova vztahu

Vzhledem k vysoké a nepraktické hodnotě konstanty  $C_T$  (řádově  $10^9 \div 10^{13}$ ) se častěji užívá ve tvaru:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} [\text{m} \times \text{min}^{-1}]$$

Taylorův vzorec 2.

kde:  $C_v[-]$  – konstanta (protože  $C_v = C_T^{1/m}$ , je řadová velikost konstanty  $C_v$  pouze  $10^2 \div 10^3$ )

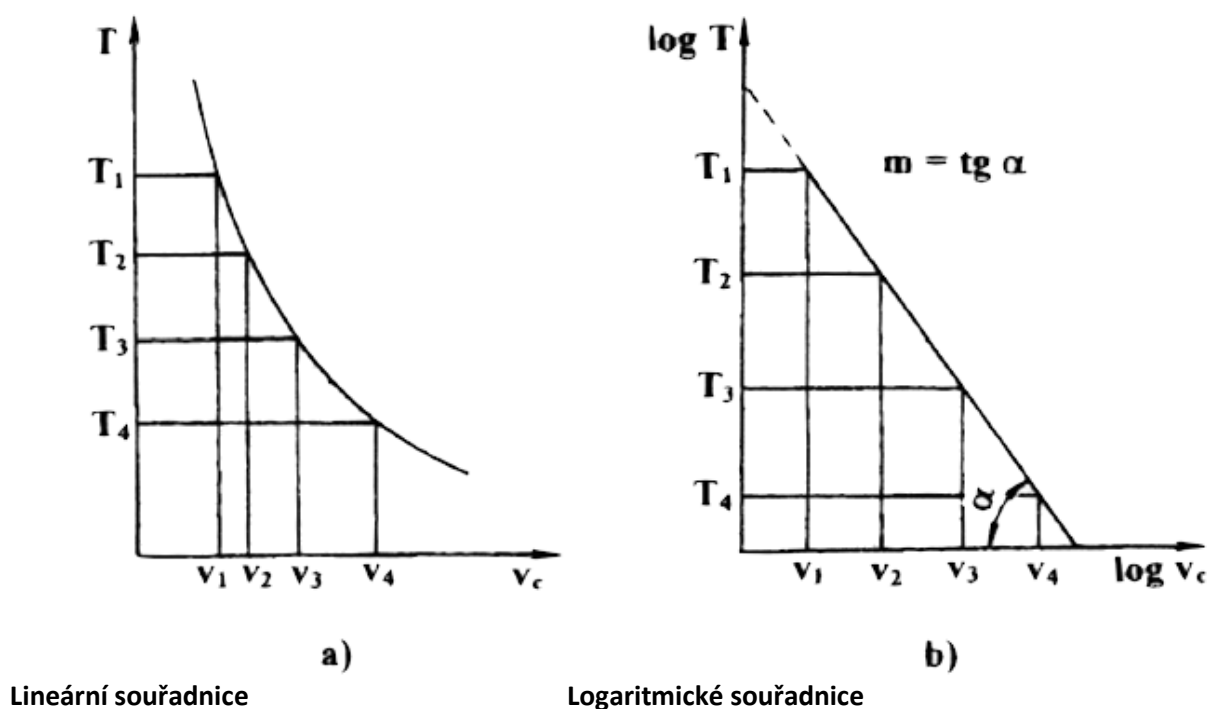
Velikost exponentu „m“ charakterizuje zejména vlastnosti řezného nástroje:

nástrojové oceli  $m = 10 \div 8$  (až 6)

rychlořezné oceli  $m = 8 \div 5$  (až 3)

slinuté karbidy  $m = 5 \div 2,5$  (až 2)

řezná keramika  $m = 2,5 \div 1,5$  (až 1,2)



Obr. 14 Průběh závislosti  $T = \frac{C_T}{v_c^m} [10]$

Postup při stanovení základní  $T-v_c$  závislosti pro konkrétní sestavu nástroj – obrobek vychází z definice trvanlivosti. Za konstantních řezných podmínek (u soustružení: šířka záběru ostří  $a_p = \text{konst}$ , posuv na otáčku  $f = \text{konst}$ , procesní prostředí) je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje ( $VB$ ), který se vynáší do grafu závislosti  $VB=f$  (čas) viz. Obr.1. Z důvodu dosažení rovnoměrného rozložení jednotlivých bodů pro konstrukci  $T-v_c$  se pro nástroj ze slinutého karbidu volí řezné rychlosti podle řady R20, kterou předepisuje norma ČSN ISO 3685. U nástrojů z keramických materiálů se volí řada R10 a u nástrojů z rychlořezné oceli R40.

Při nejvyšší řezné rychlosti by neměla trvanlivost klesnout pod  $T=5$  minut, popřípadě při obrábění drahých materiálů se připouští nižší trvanlivost, ne však menší než  $T=2$  minuty.

U zvoleného kritéria je nejdříve stanovena hodnota opotřebení (např.  $VB=kost=0,3$  mm) a z časových křivek  $VB$  jsou poté odečteny hodnoty trvanlivosti  $T_1, T_2, T_3$  a  $T_4$ , které odpovídají jednotlivým řezným rychlostem  $v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}$  a  $v_{c4}$ . Následně jsou vzniklé body  $v_{c1}-T_1, v_{c2}-T_2, v_{c3}-T_3, v_{c4}-T_4$  vyneseny do grafu s logaritmickými souřadnicemi  $T$  a  $v_c$ , kde vytvoří přímku, která odpovídá zvolené hodnotě  $VB$ . Na základě uvedených vzorců (viz. Taylorův vzorec 1,2) je dopočítána závislost  $T-v_c$ , kde lze odečíst na ose  $T$  hodnotu konstanty  $C_T$  pro řeznou rychlost  $v_c = 1$  [ $m \times min^{-1}$ ], velikost konstanty  $C_v$  na ose  $v_c$  pro trvanlivost  $T=1$  min, exponent  $m$  je vyjádřením směrnice vytvořené přímky,  $m = tg \alpha$ . Problémem základních vztahů závislosti  $T-v_c$  je, že jsou omezeny určitými podmínkami jako:

- šířkou záběru ostří  $a_p=kost$ .
- posuvem na otáčku  $f=kost$ .
- opotřebením  $VB=kost$ . [12]

V praxi jsou proto často používány komplexní tvary Taylorova vzorce ve tvaru:

$$\text{Pro výpočet řezné rychlosti} \quad v_c = \frac{C'_v}{T^{\frac{1}{m}} \times a_p^{x_v} \times f^{y_v}}$$

$$\text{Pro výpočet trvanlivosti} \quad T = \frac{C'_T}{v_c^m \times a_p^x \times f^y}$$

kde:  $C'_v, C'_T[-]$  – Taylorovy konstanty (i při stejné kombinaci nástroj obrobek mají jinou hodnotu)

$T$  [min] – Trvanlivost nástroje

$m$  [-] – exponent Taylorova vztahu

$a_p$  [mm] – hloubka záběru ostří

$f$  [ $mm \times ot^{-1}$ ] – posuv

$x, y$  [-] – exponenty Taylorova vztahu[11]

Výhodou těchto vztahů je, že mají menší počet omezujících podmínek, protože  $T=\text{konst}$ ,  $VB=\text{konst}$ . Nevýhodou oproti původním vzorcům (viz. Taylorův vzorec 1,2) je však potřeba mnohem většího rozsahu zkoušek, které jsou potřebné pro jejich konkrétní určení [12]

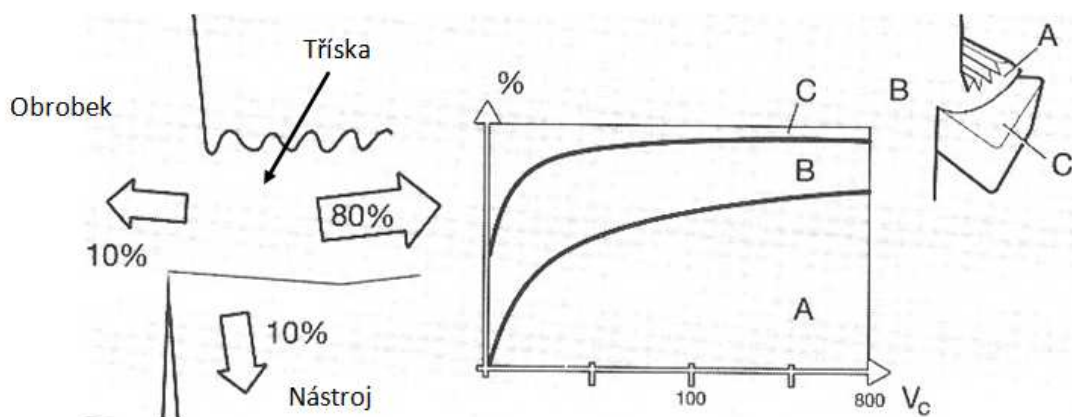


### 3. ANALÝZA VLIVU PROCESNÍCH KAPALIN NA TRVANLIVOST NÁSTROJE PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ, KLASIFIKACE PROCESNÍCH KAPALIN PRO OBRÁBĚNÍ, VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKY PROCESNÍCH KAPALIN.

#### 2.1 Analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivosti nástroje při třískovém obrábění

Procesní kapaliny významně ovlivňují průběh a výsledek obráběcího procesu. Jejich hlavní funkcí je odvádění tepla z místa řezu, jehož je dosaženo chlazením nebo mazáním, které vede ke snížení tření. Volba vhodné procesní kapaliny tedy znamená zvýšení trvanlivosti nástrojů a zlepšení jakosti obráběné plochy.

Vzhledem k tepelné bilanci při obrábění je důležitý zejména chladicí účinek kapaliny. Při třískovém obrábění se až 99% energie mění v teplo, které má negativní vliv zejména na přesnost obrobku, vlastnosti nástroje a povrchové vrstvy. Vzniklé teplo je odváděno především třískou (asi 80%) dále pak v menší míře nástrojem a obrobkem (každý po 10%)[11]



Obr.15 Odvod tepla z místa řezu [13]

Problémem u procesních kapalin však jsou jejich nezanedbatelné provozní náklady a vliv na životní prostředí. Proto je dnes trend snižování množství použitých procesních kapalin popřípadě vývoj ekologických kapalin, které nezatěžují životní prostředí a lze je snadněji odbourat.

## 2.2 Klasifikace procesních kapalin pro obrábění

Procesní kapaliny se dělí do dvou skupin:

- Chladicí kapaliny - převažuje chladicí účinek, vodou mísitelné
- Řezné oleje - převažuje mazací účinek, vodou nemísitelné

Procesní kapaliny s lepším chladicím účinkem jsou založeny na vodní bázi a kapaliny s převládajícím mazacím účinkem jsou založeny na bázi oleje. Na trhu jsou již dnes k dostání kapaliny, které splňují oba účinky zároveň, jak mazací tak chladicí.

Procesní kapaliny rozdělené podle složení:

- Vodní roztoky
- Emulzní kapaliny
- Mastné oleje
- Minerální oleje
- Zušlechtěné řezné oleje
- Syntetické a polosyntetické kapaliny

### 2.2.1 Vodní roztoky

Jsou nejjednodušší procesní kapaliny. Nemají však další výhody. Mají velmi dobrý chladicí a čistící účinek avšak téměř žádný mazací účinek. Základ roztoku je voda, která vyžaduje řadu úprav např. změkčování a přidávání aditiv proti korozi, pěnivosti a zlepšení smáčivosti. Vodní roztok musí být vždy alkalický (zásaditý).

Problémem u těchto kapalin je nebezpečí růstu anaerobních bakterií, které způsobí tvorbu kalu a zápach.

Obr. 16 Soustružení s vodou



### **2.2.2 Emulzní kapaliny**

Jsou tvořeny disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna kapalina tvoří mikroskopické kapky rozptýlené v druhé kapalině (olej + voda). Do soustavy se z důvodu stability přidává aditivum, tzv. emulgátor, který zmenšuje mezipovrchové napětí kapalin a zabraňuje koagulaci částic oleje ve vodě.

Emulze spojují přednosti vody a mazacích olejů. Její chladicí účinek je závislý na koncentraci emulze, přičemž s rostoucí koncentrací klesá chladicí účinek. Ochrana proti korozi je závislá na hodnotě pH, které emulze dosahuje. Tato závislost je však menší než u vodných roztoků. Hodnota pH v rozmezí 8÷9 je dostatečná pro ochranu proti korozi u slitin železa. Emulzní kapaliny jsou nejčastěji používanými procesními kapalinami, tvoří asi 80% z celkového objemu. [6]

### **2.2.3 Mastné oleje**

Tvoří látky rostlinného a živočišného původu, které mají podobné vlastnosti jako oleje minerální. Oproti minerálním olejům mají nižší povrchové napětí a tudíž lepší smáčivost, díky které mají lepší odvod tepla z místa řezu.

Nevýhoda mastných olejů je sklon ke stárnutí, při kterém dochází ke změně pH a zvyšování kyselosti. Z olejů se nejvíce používá řepkový, lněný a ricinový olej.

### **2.2.4 Minerální oleje**

Jsou vyrobeny z ropy, mají dobrý mazací a ochranný účinek ale špatný chladicí účinek. Dobře odolávají stárnutí. Z důvodu dobrých provozních vlastností se používají jako základ pro řezné oleje.[14]

### **2.2.5 Zušlechtěné řezné oleje**

Jedná se o zušlechtěné minerální oleje přísadami, které zvyšují mazací schopnost a tlakovou únosnost kapaliny. Jako přísady se používají mastné látky, organické sloučeniny nebo pevná maziva.

- Mezi mastnými látkami jsou obvykle zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery. Za normálních tlaků zlepšují mazací

schopnost a zvyšují přilnavost oleje ke kovu. Za extrémních tlaků však tyto vlastnosti ztrácí.

- Organické sloučeniny používají jako základ síru, chlor a fosfor. Vykazují dobré vlastnosti i za vysokých tlaků. Na obráběném povrchu vytvářejí tenkou vrstvu kovových mýdel, která snižuje tření a zabraňuje kovovým svarům. Sloučeniny, které obsahují chlór, mají za následek snížení tření v třecích plochách. Nevýhodou je jejich klesající účinnost nad 400°C. Vyššího účinku dosahují sloučeniny s fosforem. Nejúčinnější je ale kombinace všech tří látek najednou, tedy sloučenina síry, chloru a fosforu.
- Pevná maziva na obráběném povrchu vytvářejí mezní vrstvu, která odolává vysokým tlakům a zlepšuje mazací schopnost řezného oleje. Jako pevná maziva se používají grafit nebo siřník molybdenu. Nevýhoda pevných maziv je, že se tyto látky v kapalinách nerozpouští a proto se musí udržovat v disperzním stavu. [8]



Obr. 17 Obrábění s řezným olejem [15]

### 2.2.6 Syntetické a polosyntetické kapaliny

Obecně mají tyto kapaliny dobré chladicí, mazací a ochranné účinky. Jsou rozpustné ve vodě a mají dobrou provozní stálost.

Syntetické procesní kapaliny neobsahují minerální ani žádné syntetické oleje. Skládají se ze směsi maziv a dalších aditiv, které upravují její vlastnosti. Mají dobré chladicí a mazací účinky a při použití protipěnovostních aditiv je lze používat i při zvýšeném tlaku. Díky nepřítomnosti minerálního oleje nedochází k biologickému rozkladu a kapalina má dobrou provozní stálost. Neobsahují též chlór, fenoly a dusitany a jsou tak méně nebezpečné pro životní prostředí.

Polosyntetické kapaliny vznikají přidáním oleje do kapalin syntetických, které mají lepší mazací schopnosti. Rozptýlené části jsou však mnohem menší než v emulzích.



Obr. 18 Příklad použití syntetických kapalin mísitelných s vodou[16]

## 2.3 Vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin

- Chladicí účinek
- Mazací účinek
- Čistící účinek
- Provozní stálost
- Ochranný účinek
- Zdravotní nezávadnost
- Přiměřené provozní náklady



Obr. 10 Náročnost jednotlivých operací na chladicí a mazací účinek [19]

### Chladicí účinek

Pod pojmem chladicí účinek se rozumí schopnost procesní kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každá kapalina, která smáčí povrch kovů a mezi kapalinou a povrchem obrobku existuje tepelný spád. K odvodu tepla při obrábění dochází stykem nástroje, obrobku a třísky s kapalinou, která odvádí vzniklé teplo. Výsledkem snížení teploty řezání je menší opotřebení, vyšší trvanlivost nástroje a lepší jakost obrobené plochy (v obrobené ploše zůstávají menší hodnoty zbytkových napětí).

Velikost chladicího účinku procesní kapaliny je závislá na smáčecí schopnosti kapaliny, výparném teple, měrném teple, rychlosti vypařování za určitých teplot, tepelné vodivosti materiálů a průtokovém množství kapaliny. Čím budou hodnoty

těchto veličin větší, tím větší bude chladicí účinek kapaliny. Rostoucí výparné teplo sice také zvětšuje chladicí účinek ale přílišné odpařování je však nežádoucí.

Procesní kapaliny s chladícím účinkem se používají u obrábění, kde jsou velké řezné rychlosti a vysoké teploty v místě řezu, které je třeba chladit.

### **Mazací účinek**

Mazacího účinku je dosaženo vlastností kapaliny vytvářet na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření v místě řezu. Z důvodu vysokých tlaků vznikajících při řezání, nemůže dojít ke kapalnému tření. Může ale dojít ke vzniku mezního tření pokud má kapalina velkou afinitu ke kovu, nebo váže-li se s materiálem obrobku chemicky v mezní vrstvě. Důsledkem mazacího účinku je zmenšení řezných sil, zlepšení jakosti obrobeného povrchu a v neposlední řadě zmenšení spotřeby energie.

Mazací schopnost procesní kapaliny je závislá na viskozitě a na pevnosti mezní vrstvy, kterou kapalina vytváří. Kapalina s příliš vysokou viskozitou proniká mezi třecí plochy obráběcího stroje, čímž zhoršuje svoje proudění a snížení odvodu tepla z místa řezu. Vysoká viskozita má také za následek ulpívání kapaliny na tříse, kvůli kterému dochází k jejím značným ztrátám. Pevnost vrstvy, kterou kapalina vytváří, se dá zvýšit přísadami povrchově aktivních látek, díky kterým kapalina snáze proniká do trhlin deformovaného kovu a usnadňuje tak řezací proces.

Procesní kapaliny s mazacím účinkem se používají u dokončovacích obráběcích operací, výrobě závitů, ozubených kol nebo při protahování.[6]

## **Čistící účinek**

Smyslem čistícího účinku procesní kapaliny je odplavování třísek z místa řezu, aby nedocházelo k poškození povrchu obrobku nebo břitu nástroje. Zpevněná tříska se totiž může zpět do řezu, což má za následek snížení trvanlivosti břitu a poškození povrchu obrobku.[18]

Čistící účinek má významnou roli při broušení, řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr.

## **Provozní stálost**

Provozní stálost procesní kapaliny je dána dobou její výměny. Dlouhodobé používání procesní kapaliny je podmíněno jejími neměnnými vlastnostmi po dobu používání kapaliny. Stárnutí procesní kapaliny na bázi oleje je doprovázeno tvorbou pryskyřičnatých usazenin, které mohou vést i k poruše stroje. Vlivem stárnutí také dochází ke zhoršování funkčních vlastností procesní kapaliny, její rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztráta ochranného účinku a následná koroze. Provozní stálost procesní kapaliny je závislá na jejích chemických a fyzikálních vlastnostech a velikosti pracovní teploty.

## **Ochranný účinek**

Ochranný účinek procesních kapalin chrání kovy a stroj před účinky koroze. Jinak by bylo nutné výrobky mezi jednotlivými operacemi konzervovat a samotný stroj chránit před účinky koroze. Pro zaručení antikorozního účinku se do procesních kapalin přidávají pasivační přísady. Důležitou podmínkou je, aby kapalina nebyla agresivní vůči stroji, tj. aby nerozpouštěla nátěry stroje a gumová těsnění.



## **Zdravotní nezávadnost**

Jelikož procesní kapalina přichází do přímého styku s obsluhou stroje, nesmí být zdraví škodlivá. Nemůže tedy obsahovat látky dráždící sliznici nebo pokožku, nemůže být jedovatá a zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem. Zdravotní nezávadnost procesní kapaliny je také ovlivněna její provozní stálostí a čistotou. Z hlediska čistoty je třeba dbát na základní hygienická opatření.

## **Přiměřené provozní náklady**

Provozní náklady jsou v největší míře ovlivněny spotřebou procesních kapalin. Při rozboru nákladů se nejdříve posuzuje jejich vliv na obráběcí proces, např. opotřebení, trvanlivost, ostření, výměna nástroje nebo spotřeba elektrické energie. Poté se posuzuje jejich provozní stálost, spotřeba, výměna a náklady na likvidaci.

Jelikož cena není dostačujícím ani hlavním parametrem výběru procesní kapaliny, musí se rozhodnout až po tomto technicko-ekonomickém rozboru o volbě vhodné procesní kapaliny.

## 2.4 Přívod procesní kapaliny do místa řezu

Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu významně ovlivňuje výsledné parametry řezného procesu. Zejména jde o trvanlivost břítu nástroje a jakost obrobené plochy.

Rozdělení základních způsobů přívodu procesní kapaliny do místa řezu:

- Standardní chlazení
- Tlakové chlazení
- Podchlazování procesních kapalin
- Chlazení procesní mlhou
- Vnitřní chlazení

### Standardní chlazení

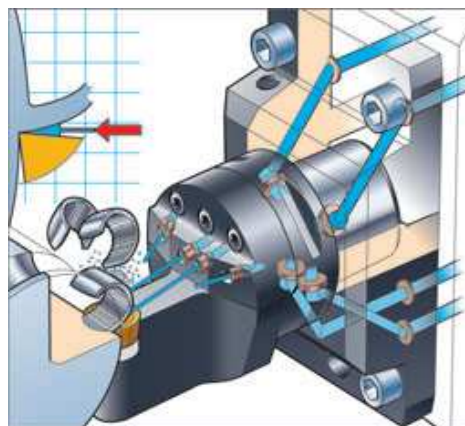
Standardní chlazení je nejjednodušší a nevyžaduje žádnou další úpravu přívodního potrubí nebo stroje. Zařízení tvoří nádrž na procesní kapalinu, čerpadlo a rozvodové potrubí sloužící k dopravě kapaliny do místa řezu. Množství kapaliny, kterou je schopen systém dodat, je dán typem čerpadla a škrcením průtoku na výstupním kohoutku.

### Tlakové chlazení

Při tlakovém chlazení je procesní kapalina přiváděna ze spodu na břit nástroje, přímo do místa řezu. Hodnoty dosahovaných tlaků se pohybují v rozmezí  $0,3 \div 3$  MPa a průměr výstupní trysky v rozmezí  $0,3 \div 1$  mm. Tlakové chlazení se používá při obrábění tam, kde vzniklé teplo má prokazatelně nepříznivý vliv na trvanlivost nástroje.

Množství přiváděné kapaliny je v rozmezí  $0,5 \div 20$  litrů za minutu. Použití zvýšených tlaků při chlazení má za následek rozstřík procesní kapaliny a tvorbu mlhy. Proto je nutné uzavřít pracovní prostor stroje, aby se zamezilo úniku kapaliny a znečištění pracovního prostředí.

Obr. 20 Schéma tlakového chlazení [18]



## Podchlazování procesních kapalin

Zvýšení trvanlivosti nástrojů lze docílit i podchlazením procesních kapalin na teplotu nižší než je teplota okolí. Obvyklé druhy procesních kapalin si zachovávají mazací schopnost i při podchlazení na  $5 \div 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , oleje při  $15 \div 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je možné podchlazovat i na nižší teploty, to je však omezeno stálostí procesní kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů. Dalšího zvýšení výkonu můžeme dosáhnout, podchladíme-li kapalinu pod bod mrazu. V tomto případě je ale nezbytné použít procesní kapaliny se speciálním složením.

## Chlazení procesní mlhou (MQL)

Procesní kapalina je v tomto případě rozptýlena tlakem vzduchu vytékajícího z trysky rychlostí až  $300 \text{ m.s}^{-1}$  a přímo směřuje na řeznou část nástroje před jeho najetím do řezu. Vlivem rozpínajícího se vzduchu, který obsahuje částice procesní kapaliny, se dosáhne velmi dobrého odvodu tepla z místa řezu.

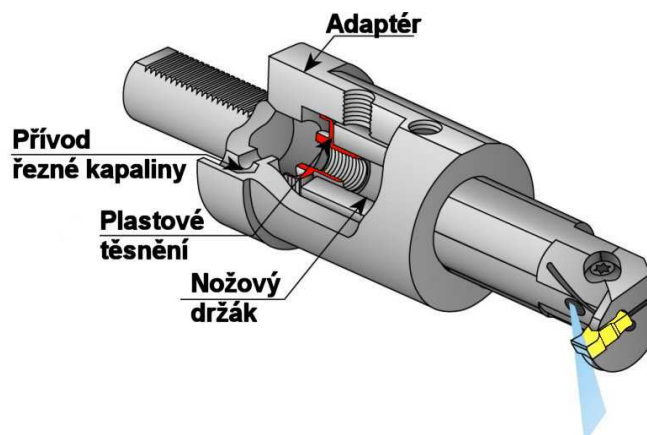


Obr. 21 Chlazení procesní mlhou [19]

## Vnitřní chlazení

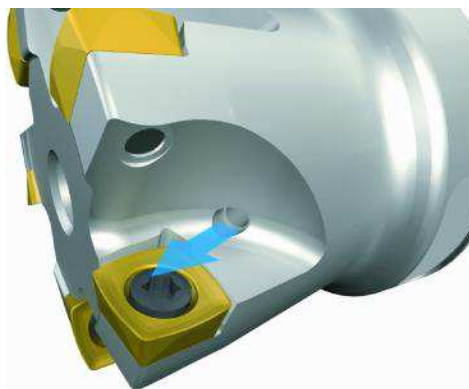
Přívod procesní kapaliny je v tomto případě realizován vnitřkem nástroje, přímo do místa řezu na břit nástroje. Tato metoda přináší výrazné zvýšení výkonu při obrábění a zvýšení řezné rychlosti v řádu  $5 \div 15 \text{ } \%$ . Vnitřního chlazení se nejvíce používá u soustružení, frézování, vrtání a broušení.

Při soustružení se nejvíce uplatňuje u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami.



Obr. 22 Schéma soustružnického nože s vnitřním chlazením

Použití vnitřního chlazení při frézování má tu výhodu, že procesní kapalina je přiváděna na všechny břity nástroje po celou dobu jeho dráhy, tedy i po dobu, kdy není břit v záběru.

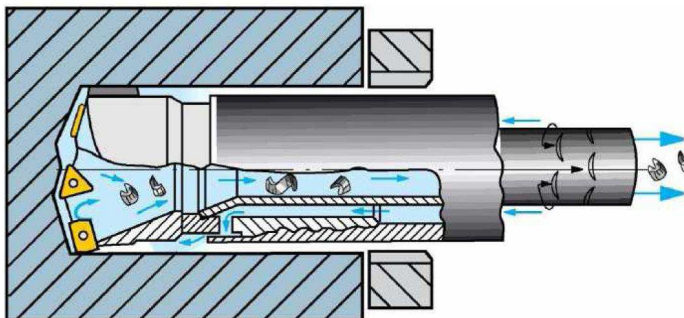


Obr. 23 Model frézy s vnitřním chlazením[20]

Při broušení je přívod kapaliny realizován přes póry brusného kotouče, odkud odplavuje třísku a nečistoty vzniklé při obrábění. Aby kapalina sama nezanášela póry, musí procházet skrz čistící filtry, které ji nečistot zbaví.

U vrtání je procesní kapalina přiváděna centrálními otvory v tělese nástroje až do místa řezu. Nástroji mohou být jak šroubové monolitní vrtáky, tak i vrtáky

s vyměnitelnými břitovými destičkami. Vnitřní chlazení se používá hlavně při vrtání hlubokých děr a těžkoobrobitelných materiálů. Zvýšením tlaku procesní kapaliny lze dosáhnout zvýšení obráběcího výkonu a lepšího odvodu třísek z místa řezu.



Obr. 24 Schéma vrtání hlubokých děr vrtací hlavicí s vnitřním chlazením[21]

### **Plynné řezné prostředí**

Plynné látky se jako procesní média běžně v praxi nevyskytují. Mají nízký chladicí účinek, žádný mazací účinek a obtížně odvádí třísku.

Jako účinný způsob chlazení plynem se používá stlačený  $\text{CO}_2$ , který se přivádí paprskem plynu do místa řezu. Tlaky, kterých se při chlazení dosahuje, jsou v rozmezí  $0,5 \div 7$  MPa. Tato metoda se používá např. pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Je sní ale spojena řada nevýhod, mezi něž patří zejména vysoká pořizovací cena  $\text{CO}_2$  a sním spjaté nebezpečí jeho používání. Je nutné dokonalé odsávání plynného média a větrání pracoviště.

Speciálním případem použití plynného média je tzv. suché obrábění. Při tomto způsobu je řezným prostředím atmosférický vzduch. Případné rozšíření toho způsobu obrábění je však spjato s vývojem nových řezných materiálů, které by nevyžadovali chlazení, a přesto by byly schopny efektivně obrábět.



Obr. 25 Chlazení plynem [22]

### **3. SHRUTÍ POZNATKŮ O INTEGRITĚ POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ, DEFINICE POJMU DRSNOST POVRCHU, METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.**

#### **3.1 Shrnutí poznatků o integritě povrchu po obrábění**

Aby bylo možné zlepšovat obráběcí procesy a vytvářet obrobené plochy bez poruch, je nutné znát průvodní mechanismy při vytváření nového povrchu obrobku.

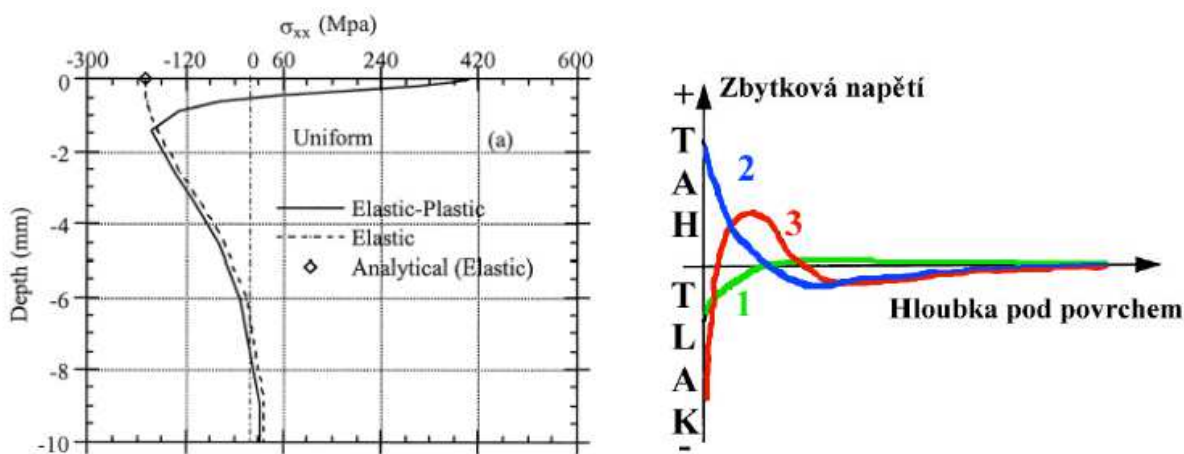
Všechny změny, ke kterým dochází v povrchové vrstvě obrobku, lze identicky posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se mohou porovnávat s budoucí funkcí obrobené plochy a využívat je tak pro hodnocení její integrity.[23]

Nejčastěji sledované vlivy z hlediska integrity povrchu lze rozdělit na vnější a vnitřní:

- Vnější vlivy:**
- Mechanické (provozní napětí)
  - Chemické (koroze)
  - Fyzikální (záření, bludné proudy, atd.)
  - Kombinace více vlivů (koroze pod napětím, elektrochemická koroze, tepelné zpracování)
- Vnitřní vlivy:**
- Zbytková napětí
  - Morfologie povrchu (drsnost)
  - Materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění, povrchová úprava)
  - Přítomnost povrchových a podpovrchových vad a heterogenní struktura (vměstky, uhlík v litině) [24]

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v potaz následky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a klade je do poměru k funkčním požadavkům na celý obrobek.

Problémem však je, že zatím neexistuje způsob, kterým by bylo možné komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska její integrity. I když se spousta údajů o obrobené ploše běžně zjišťuje nebo jsou zpracovány postupy a navrhovaná zařízení, zatím nejspolehlivější zkouškou integrity zůstává její vlastní provoz. [23]



Obr. 26 Hloubkové rozložení zbytkového napětí a rozložení zbytkových napětí dle charakteru vzniku

**Křivka č. 1:** Zbytkové napětí od plastické deformace po brusném kotouči na povrchu i v podpovrchových partiích. Napětí má tlakový charakter a je závislé na drsnosti povrchu, jeho stavu a profilu výstupků.

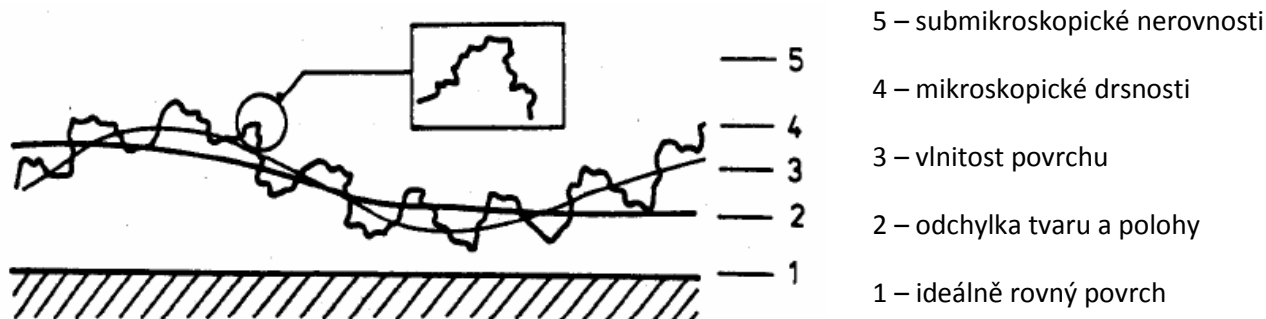
**Křivka č.2:** Zbytkové napětí vzniká při ohřevu a následném ochlazení povrchu. Napětí má tahový charakter.

**Křivka č.3:** Martenzitická transformace způsobená teplotními změnami při broušení. Napětí je na povrchu tlakové a pod povrchem se mění v tahové. Právě při tomto zbytkovém napětí vzniká největší nebezpečí vzniku trhlinek.[24]

### 3.2 Definice pojmu drsnost povrchu

Pojem drsnost povrchu znamená souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, ke kterým nevyhnutelně dojde během výroby nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nezapočítávají vady povrchu přesněji náhodné a nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují ojediněle (rysky, trhlinky), a které vznikají vadami materiálu nebo poškozením.

Drsnost se posuzuje v příčném nebo podélném směru, podle toho v jakém směru převládají nerovnosti. Hodnoty drsností se vyhodnocují na skutečných profilech, které vychází z redukce prostoru povrchu do roviny kolmé k povrchu. Získaný profil je základním zdrojem informací.[6]



Obr. 27 Schematické znázornění geometrie povrchu [25]

Drsnost povrchu nejvíce ovlivňují následující faktory:

- Způsob opracování
- Materiál obrobku
- Materiál a tvar břitu nástroje
- Řezné podmínky – zejména řezná rychlost a posuv
- Způsob upnutí obrobku, chvění nástroje i stroje a celková tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek
- Procesní prostředí

Posouzení drsnosti povrchu se provádí na základě tří základních parametrů:

- Výškové parametry
- Délkové parametry
- Tvarové parametry



### 3.3 Metody měření drsnosti povrchu

Měřit a posuzovat drsnost povrchu je možno buď přímým nebo nepřímým pozorováním a měřením profilu povrchu obrobku. V praxi se při výrobě nejčastěji setkáme s přímým pozorováním obrobené plochy obrobku lidským zrakem, případně se povrch porovnává s etalony hmatem.

Metody zkoumání povrchu lze v zásadě rozdělit na metody:

- Kvalitativní
- Kvantitativní

#### 3.3.1 Metoda kvalitativní

Kvalitativní metody jsou založeny na přímém porovnání kontrolovaného povrchu s povrchem etalonu, jehož drsnost známe. Podmínkou je, že můžeme porovnávat pouze povrchy opracované stejným nebo podobným způsobem obrábění. Výsledkem porovnání je zjištění, že kontrolovaná plocha je hladší nebo hrubší (má menší nebo větší drsnost) než plocha vzorového etalonu, resp. že její drsnost se pohybuje mezi dvěma po sobě jdoucími etalony (např.  $0,8 \div 1,6 \mu\text{m}$ ). K porovnávání se používá vzorkovnice drsnosti povrchu, které jsou obrobeny různými druhy opracování a v různých drsnostech.

Kontrolované plochy porovnáváme se vzorovými etalony zrakem nebo hmatem. Při kontrole zrakem, se pro přesnější vyhodnocení používá lupa nebo porovnávací mikroskop.

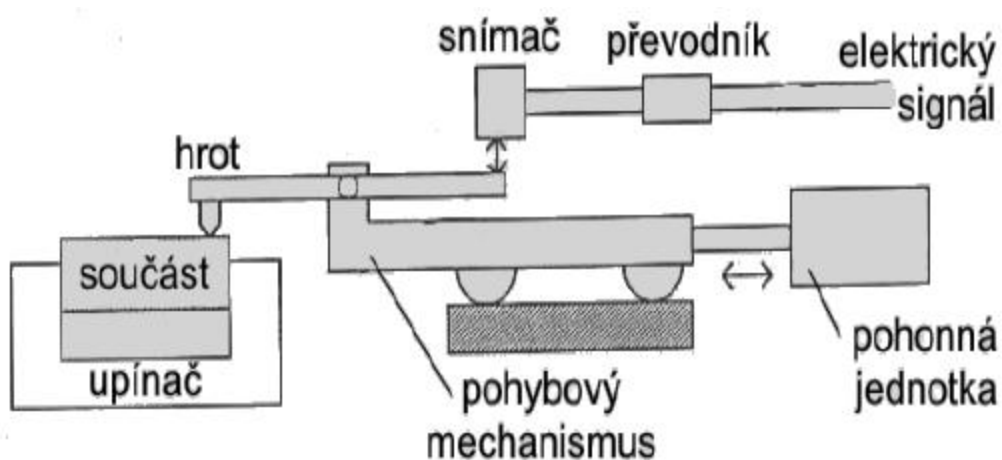


Obr. 28 Vzorkovnice drsnosti povrchu [28]

### 3.3.2 Metoda kvantitativní

Kvantitativní metody vyjadřují drsnost číselnými hodnotami Ra, Rz, případně Rz DIN. Hodnoty nerovností příčné drsnosti lze měřit elektronickým komparačním délkoměrem. Komparátor má snímač osazený tvrdým hrotem (safír, diamant) s velmi malým vrcholovým poloměrem ( $2 \div 20\mu\text{m}$ ). Při větších poloměrech by docházelo k přílišnému zkreslování profilu, naopak příliš malé poloměry by znamenaly nárůst tlaku mezi hrotem a zkoumaným povrchem. O podélný pohyb se stará pohybový mechanismus, který je převeden v převodníku na elektrický signál a následně do číselné hodnoty parametrů. Výsledkem je soubor odchylek povrchu od nulové hodnoty komparátoru.

Drsnost povrchu posuzujeme v souladu s doporučením ISO v soustavě střední čáry (m-čára). V té se drsnost povrchu posuzuje na základě střední aritmetické úchytky Ra a výšky nerovností Rz. Někdy je možné z praktických důvodů naměřenou drsnost posoudit podle Rz DIN.

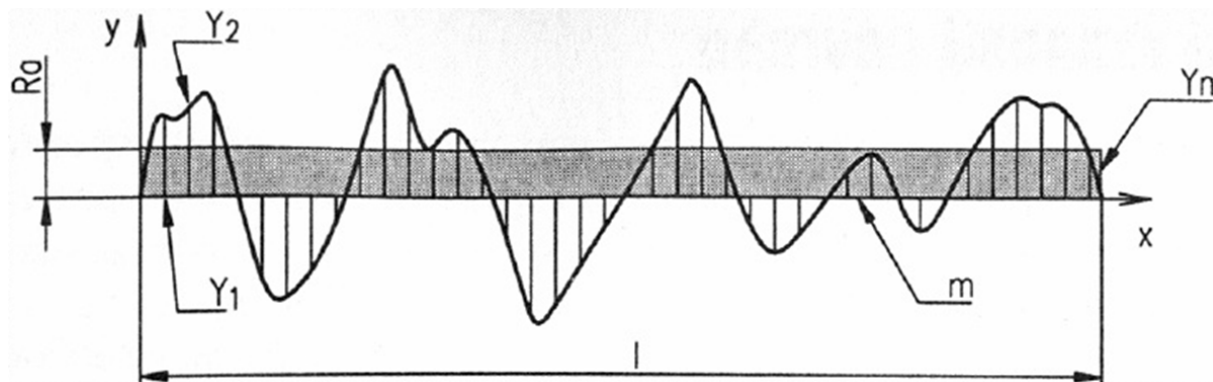


Obr. 29 Schéma elektronického drsnoměru [26]

## Posouzení drsnosti povrchu podle střední aritmetické úchyly $R_a$

Střední aritmetická úchylna  $R_a$  je aritmetický průměr absolutních hodnot v rozsahu měřené délky profilu.

Střední čára profilu (m-čára) je vztažná čára s tvarem geometrického profilu a rozděluje měřený profil tak, že součet všech čtverců odchylek od střední čáry je minimální. Neboli tak aby součty ploch nad a pod střední čárou byly stejné.



Obr.30 Profil měření drsnosti povrchu  $R_a$ [27]

Výpočet hodnoty  $R_a$  lze provádět dvěma metodami. Statistickou metodou a integrální metodou.

Statistická metoda:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| = \frac{|y_1| + |y_2| + |y_3| + \dots + |y_n|}{n}$$

Integrální metoda:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

kde:  $l$ [mm] – základní délka profilu

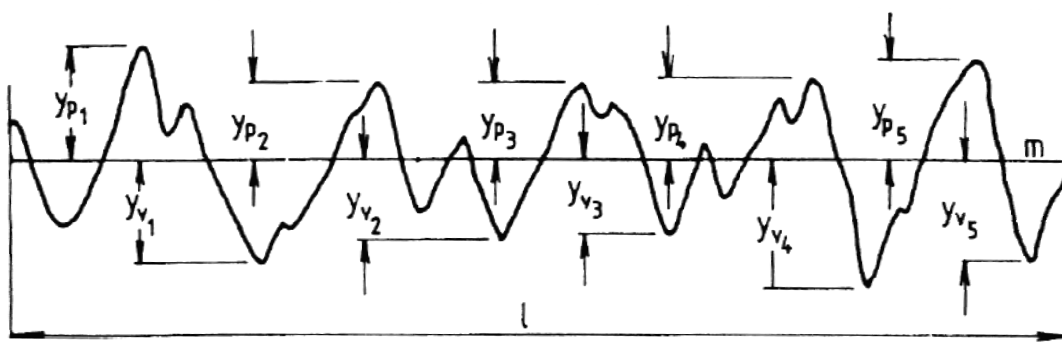
$R_a$ [ $\mu$ m] – střední aritmetická úchylna profilu

$y$ [ $\mu$ m] – jednotlivé výšky profilu

$n$  – počet jednotlivých výšek profilu

## Posouzení drsnosti povrchu podle výšky nerovností Rz

Výška nerovností Rz je střední vzdálenost mezi pěti (deseti) nejvyššími a nejnižšími body profilu v délce měřeného úseku. Měření se provádí kolmo na střední m-čáru profilu.



Obr. 31 Profil drsnosti povrchu Rz [28]

Výpočet hodnoty Rz:

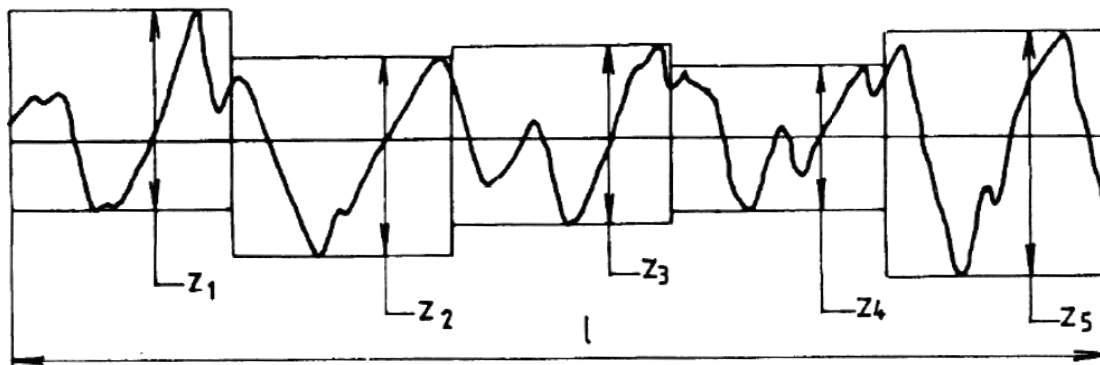
$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |y_{vj}|}{5}$$

kde:  $y_{pi}[\mu\text{m}]$  – výška i-tého nejvyššího výstupku profilu měřená od střední čáry profilu m

$y_{vj}[\mu\text{m}]$  – hloubka i-té nejnižší prohlubně profilu měřená od střední čáry profilu m

## Posouzení drsnosti povrchu podle výšky nerovností Rz DIN

Rz DIN je aritmetický průměr pěti největších výšek nerovností



Obr. 32 Profil drsnosti povrchu Rz DIN [28]

Výpočet hodnoty Rz DIN

$$R_{zDIN} = \frac{1}{5} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5)$$

kde:  $z[\mu\text{m}]$  – jednotlivé výšky nerovností

#### 4. NAVRŽENÍ METODIKY ZKOUMÁNÍ TRVANLIVOSTI NÁSTROJE A DRSNOSTI POVRCHU PŘI SOUSTRUŽENÍ NEREZOVÉ OCELI V LABORATOŘI KOM FS TUL.

##### 4.1 Popis použitých přístrojů, nástrojů a měřících zařízení

###### CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140

Analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje byla provedena na CNC soustruhu CHEVALIER FCL-2140



Obr. 33 CNC soustruh CHEVALIER FCL - 2140

Základní technické parametry soustruhu:

CNC soustruh používá řídicí systém od firmy Fagor, konkrétně FAGOR 8055

- Točný průměr nad suportem: 310 [mm]
- Točný průměr nad ložem: 540 [mm]
- Točná délka: 1000/1500/2000 [mm]
- Rozsah otáček: 27 – 2250 [ot./min]

## Soustruh SU-50

Analýza vlivu procesních kapalin na drsnost obrobené plochy byla provedena na univerzálním soustruhu SU – 50



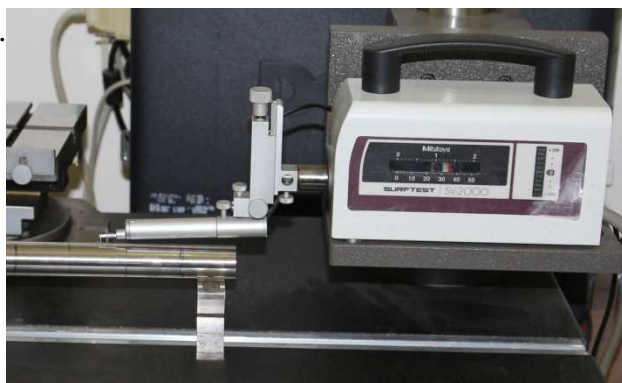
Obr. 34 Univerzální soustruh SU-50

Základní technické parametry soustruhu SU-50:

➤ Točný průměr nad suportem	250	[mm]
➤ Točný průměr nad ložem	500	[mm]
➤ Točná délka	2000	[mm]
➤ Rozsah otáček	11-1400	[ot./min]

## Drsnoměr Mitutoyo SV-2000

Měření drsnosti proběhlo v laboratořích KOM FS na drsnoměru Mitutoyo SV-2000 za pomoci software Surfpak.



Obr. 35 Drsnoměr Mitutoyo SV-2000

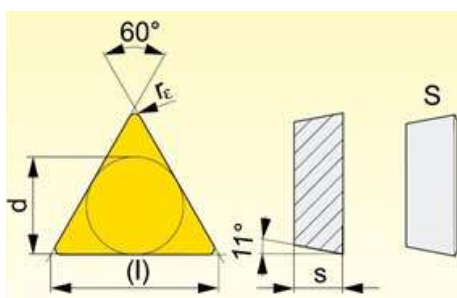
### Břítová destička TPUN 160304 ;8230

Jako řezný nástroj byly zvoleny povlakované destičky TPUN 160304 ;8230 od firmy Pramet Tools s.r.o. Na Obr. 34 jsou patrné základní parametry VBD.



Obr. 36 Krabice s břítovými destičkami a jednotlivé destičky

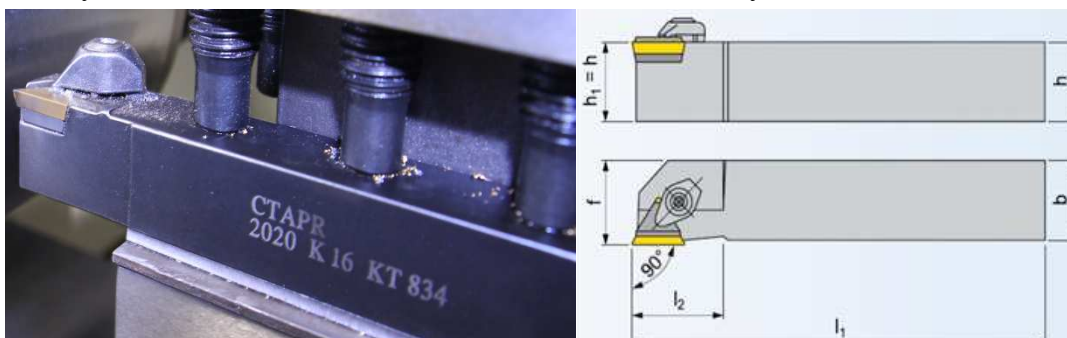
Rozměry destičky:  $l = 16,50 \text{ mm}$ ;  $d = 9,53 \text{ mm}$ ;  $s = 3,18 \text{ mm}$ ;  $r_e = 0,4 \text{ mm}$



Obr. 35 Rozměry VBD[30]

### Soustružnický nůž CTAPR 20x20 K16 KT 834

Pro soustružení obrobku byl použit soustružnický nůž s vyměnitelnými břítovými destičkami CTAPR 20x20 K16 KT 834 od firmy PrametTools, s.r.o.



Obr. 37 Soustružnický nůž a rozměry nože

Základní rozměry soustružnického nože CTAPR 20x20 K16 KT 834:

$h=h_1 = 20 \text{ mm}$ ;  $b = 20 \text{ mm}$ ;  $f = 20,5 \text{ mm}$ ;  $l_1 = 125 \text{ mm}$ ,  $l_{2\max} = 32 \text{ mm}$ ; úhel nastavení  $90^\circ$  [30]



### **Ruční refraktometr Brix 0-18% ATC**

Refraktometr Brix 0-18% byl používám během výzkumu k určování koncentrací procesních kapalin. Přesnost měření refraktometru je  $\pm 0,15\%$ .



Obr. 38 Ruční refraktometr Brix 0-18% ATC

### **Nástrojová lupa Brinell**

Pomocí nástrojové lupy Brinell se měřilo opotřebení břitu nástroje. Lupa disponuje 24x násobným zvětšením a stupnicí po 0,05mm.



Obr. 39 Nástrojová lupa Brinell

## 4.2 Charakteristika obráběného materiálu

Pro analýzu vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroj byla použita nerezová ocel ČSN 17481 o rozměrech  $\varnothing 128$  mm, délka 750 mm.

Materiál	Chemický prvek [%]						
	C	Si	Mn	P<=	S<=	Cr	Al
ČSN 17 481	0,05 ÷ 0,12	0,25 ÷ 1	17 ÷ 20	0,045	0,035	7 ÷ 9	0,2 ÷ 0,8

Tab. 3 Chemické složení materiálu ČSN 17 481 [31]

Vybrané vlastnosti oceli ČSN 17 481:

- Mn-Cr-Ti ocel pro nízké teploty
- Ocel se zaručenou svařitelností
- Austenitická
- Nemagnetická
- Žárupevná
- Použití v chemickém průmyslu [32]

Pro analýzu vlivu procesních kapalin na drsnost obrobené plochy se kvůli obtížné manipulaci (velké rozměry a hmotnost), ať už při samotném obrábění nebo při následném měření použil obrobek o jiném materiálu, konkrétně nerezová ocel ČSN 17 240 o rozměrech  $\varnothing 26$  mm, délka 520 mm.

Materiál	Chemický prvek [%]						
	C	Si	Mn	P<=	S<=	Cr	Ni
ČSN 17 240	< 0,07	< 1,0	< 2,0	0,45	0,03	17 ÷ 20	9,0 ÷ 11,5

Tab. 4 Chemické složení materiálu ČSN 17 240 [31]

Austenitická chromniklová ocel. Nejpoužívanější antikoroziční materiál. Ocel se zaručenou svařitelností. Dobře odolává vodě, vodní páře, vzdušné vlhkosti, jedlým kyselinám a slabým organickým a anorganickým kyselinám. Použitelná do teplot 400°C. Používá se mimo jiné v potravinářském a chemickém průmyslu

Materiál	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [Mpa]	Mez kluzu R <sub>p 0,2</sub> [Mpa]	Tažnost A [50%]
ČSN 17 240	550 ÷ 750	220	43

Tab.5 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 240 [7]

### 4.3 Procesní kapaliny

Jako procesní kapaliny byly použity nově vyvinuté ekologické procesní kapaliny od firmy Paramo, a.s. Jednalo se o kapaliny ESOK 1.0D, ESOK 1.0E, ESOK 1.0F, ESOK 1.1B, ESOK 1.1D. Doplnková a porovnávací procesní kapalina byla použita čistá voda z vodovodu.

Procesní kapalina	Koeficient refrakce	Hodnota na refraktometru
ESOK 1.0D	$K = 3$	$r = 1,66$
ESOK 1.0E	$K = 3,1$	$r = 1,61$
ESOK 1.0F	$K = 3,1$	$r = 1,61$
ESOK 1.1B	$K = 2,1$	$r = 2,38$
ESOK 1.1D	$K = 1,85$	$r = 2,70$

Tab. 5 Jednotlivé procesní kapaliny a hodnoty refrakcí



Obr. 40 Jednotlivé procesní kapaliny

#### **4.4 Metodika zkoumání trvanlivosti nástroje při soustružení nerezové oceli na CNC soustruhu CHEVALIER FCL – 2140**

##### **Použité přístroje a pomůcky:**

- CNC soustruh CHEVALIER FCL – 2140
- Nožový držák CTAPR 20x20 K16 KT 834
- Povlakovaná břitová destička TPUN 160304; 8230
- Ruční refraktometr Brix 0-18% ATC
- Nástrojová lupa Brinell

##### **4.4.1 Příprava měření**

###### **Příprava CNC soustruhu CHEVALIER FCL - 2140**

Před uvedením stroje do chodu bylo nutné zkontrolovat a případně doplnit provozní kapaliny stroje (mazací oleje), které se starají o mazání třecích a pohybových částí. Poté se před prvním obráběním s procesní kapalinou musel vyčistit a propláchnout chladicí okruh stroje.

Finální přípravou stroje bylo napsání CNC programu, se kterou nám pomohl pan Ing. Petr Keller Ph.D.

### **Použitý CNC program:**

- (P1=31) ;POCET PRUCHODU
- (P2=128.-P1\*1.0) ;VYCHOZI PRUMER BYL 128 mm
- (P3=-700.2+P1\*0.3) ;KONECNA DELKA OBROBKU
- (P4=P2+6.0) ;VYPOCET BEZPECNEHO PRUMERU PRO ODJETI
- G71 G18 G90
- G59
- T4 D4
- G95
- G97 S520 ;OTACKY/MIN
- M3 M8
- G0 X180. Z3. ;BEZPECNY BOD NAJETI K OBROBKU
- G1 XP2 F0.8 ;NAJETI NA POZADOVANY PRUMER DLE PARAMETRU P1
- G1 Z-50. F0.1
- G1 XP4 ;VYJETI NA BEZPECNY PRUMER + ZAROVNANI
- G0 X160.
- M05 M9 M00
- M3 M8
- G0 XP4 Z-48.
- G1 XP2
- G1 Z-100.
- G1 XP4 ;VYJETI NA BEZPECNY PRUMER + ZAROVNANI
- M5 M9
- M30

## Příprava obráběného materiálu

Manipulace s polotovarem byla po celou dobu experimentu prováděna pomocí mostového jeřábu. Obráběný polotovaz z materiálu ČSN 17 481 byl nejprve rozměřen a uříznut na požadovanou délku na pásové pile PILOUS AGR 300 PLUS. Následně se na radiální vrtačce VR4 navrtal středící důlek. Takto připravený materiál už bylo možné upnout do sklíčidla soustruhu a opřít o koník. Finální přípravou před samotným obráběcím procesem bylo najetí do referenčních bodů stroje, které určují vztažný bod prostorové orientace stroje.



Obr. 41 Upnutý obrobek v soustruhu CHEVALIER FCL 2140

## Příprava procesních kapalin

K ředění procesních kapalin byla použita čistá voda z vodovodu s neutrální hodnotou pH 7. Je důležité, aby ředící voda byla kvalitní a neobsahovala žádné příměsi, které by ovlivňovali vlastnosti následné emulze.

Samotné míchání se provádělo v čistých a dezinfikovaných kanystrech o objemu 25 litrů. Koncentrát se přiléval do vodou naplněného kanystru, kde se následně promíchával a vznikla tak emulze, jejíž koncentrace se měřila refraktometrem. Dle potřeby se doladil poměr kapalin, aby emulze měla odpovídající koncentraci, jakou doporučuje výrobce. Při samotném měření refraktometrem bylo důležité pohlídat si správný koeficient refrakce, který je pro každou kapalinu jiný a

při každém měření se ujistit, že měřicí plocha refraktometru je čistá. Jinak by mohli vznikat nepřesnosti a chyby měření vzniklé vlivem zanesených nečistot do měřené emulze.

Připravená kapalina se poté přelila z kanystru do nádrže chladicího systému CNC soustruhu CHEVALIER, kde se zbavovala hrubé třísky a dopravovala vždy zpět skrz čerpadlo a potrubí až k místě řezu. Během obrábění bylo nutné refraktometrem kontrolovat koncentraci emulze a případně doladit na správnou hodnotu. Během obrábění se totiž koncentrace procesní kapaliny může měnit vlivem, vypařování kapaliny nebo netěsnostmi mazacího okruhu stroje může pronikat mazací kapalina. Po skončení obrábění se stroj a chladicí okruh propláchl vodou a použitá procesní kapalina byla odčerpána a uskladněna v plechových 200 litrových sudech, odkud se pak odvážela k ekologické likvidaci.



Obr.42 Nádrž chladicího systému CNC soustruhu CHEVALIER

#### 4.4.2 Postup měření trvanlivost břitu nástroje

##### Stanovení řezných podmínek

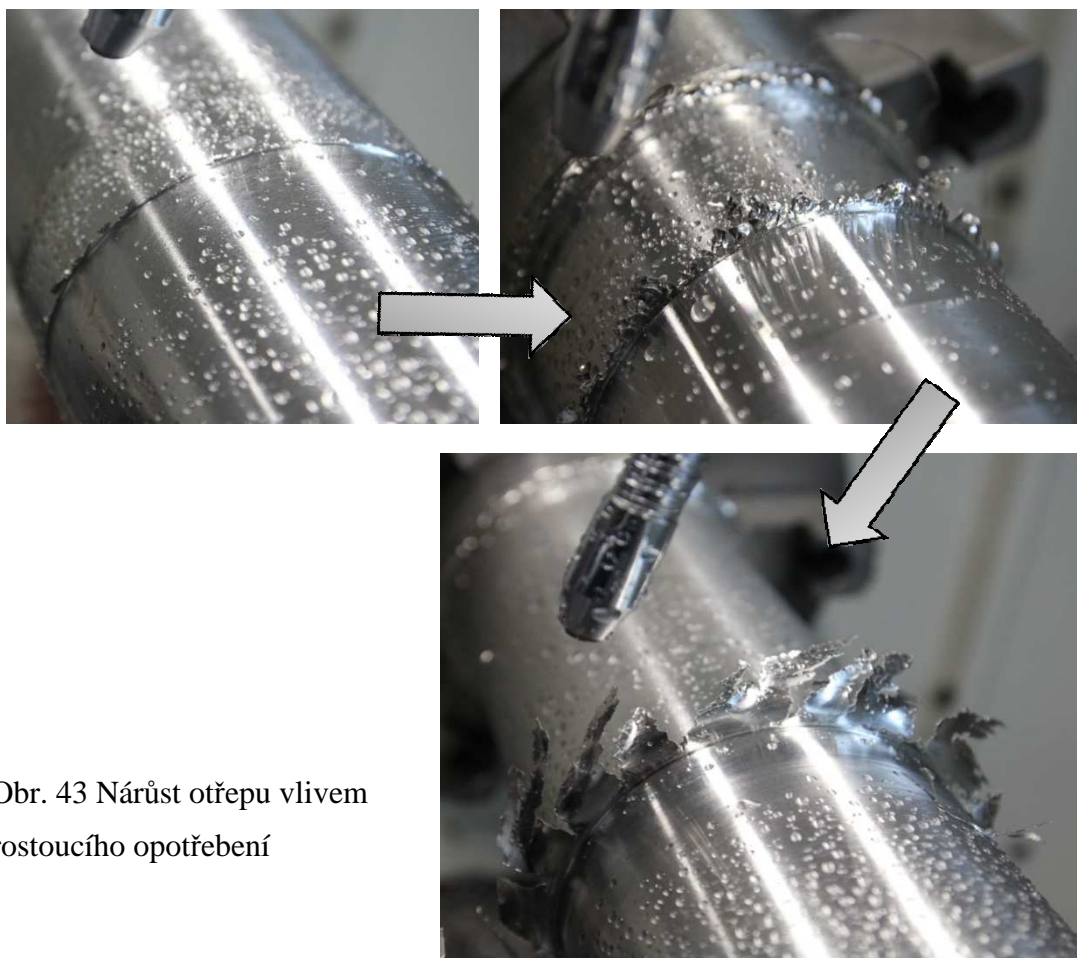
Před samotným obráběním bylo ještě nutné stanovit vhodné řezné podmínky a zapsat je do používaného CNC programu. Posuv  $f = 0,1 \text{ mm/ot.}$  a hloubkou záběru  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  byly dány, bylo však nutné stanovit řeznou rychlost, která by byla optimální pro náš experiment. Příliš vysoká řezná rychlost by znamenala příliš rychlé opotřebení a naopak pomalá by znamenala velkou časovou materiálovou náročnost. Proto byly provedeny první měření bez použití procesní kapaliny, během kterých se stanovila optimální řezná rychlost na  $v = 160 \text{ m/min.}$



Jelikož by docházelo ke zmenšování řezné rychlosti vlivem zmenšujícího se průměru, byl použitý CNC program napsán tak, aby umožňoval plynulou změnu otáček. Tím tedy bylo zaručeno, že řezná rychlost bude konstantní během celého experimentu.

### **Metodika měření trvanlivosti nástroje**

Jako optimální vzdálenost pro měření hodnot trvanlivosti břitů byla zvolena délka obrábění 50mm, která byla zapsána do CNC programu. Po každém ujetí 50mm se tedy stroj zastavil a čekal na zásah obsluhy, zda může obrábět dál nebo bude nutné vyčkat a změřit opotřebení břitů nástroje. Ne vždy bylo totiž nutné měřit trvanlivost břitů po ujetí každých 50mm. O velikosti opotřebení a nutnosti jeho měření vypovídaly změny v chování stroje a celkově procesu obrábění, mezi které patřily např. růst otřepu, změna drsnosti obrobeného povrchu nebo chvění stroje. Měřilo se nejen opotřebení hřbetu nástroje ale i celková ujetá dráha nástroje a celkový čistý čas obrábění. Jako hodnota meze opotřebení břitů nástroje na hřbetu byla zvolena hodnota 0,5mm. Přejíždění nástroje po obrobku se tedy opakovalo do té doby, dokud opotřebení břitů na hřbetu nedosáhlo hodnoty 0,5mm.



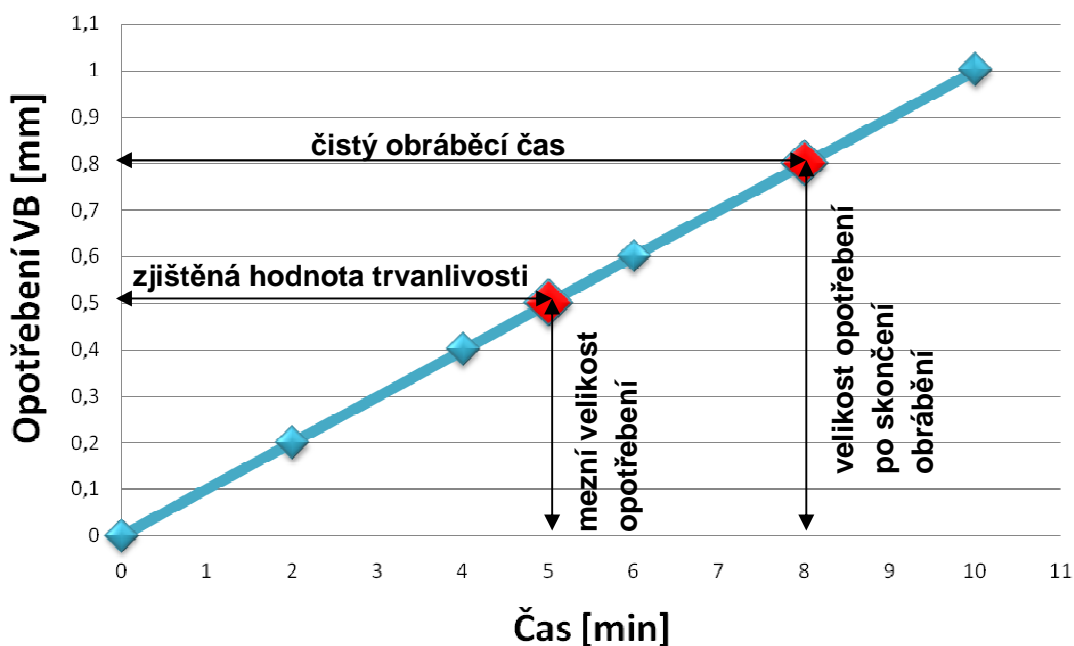
Obr. 43 Nárůst otřepu vlivem rostoucího opotřebení



Celková délka ujetá nástrojem se poté vypočítala pouhým přenásobením počtu přejetí nástroje a jednotlivé délky přejetí tedy 50mm. Celkový čistý čas obrábění se počítal obdobně. Nejprve bylo nutné zjistit čistý čas jednotlivé délky obrábění, bez najetí a vyjetí nástroje z místa řezu a poté ho přenásobit počtem přejetí. Čistý čas jednotlivé délky se mohl buď odečíst z pracovního monitoru stroje, nebo dopočítat na základě známých řezných podmínek.

Pro měření opotřebení břitů nástroje se musela destička vyjmout z nože a očistit od nečistot popřípadě nárůstků, které by znemožňovali přesné měření. Samotné měření se provádělo nástrojovou lupou Brinell (Obr.39), do které se vložila destička a okulárem se zaostřilo na její opotřebení. Hodnoty se poté pro každou destičku zvlášť vynášeli do tabulky a grafu.

Jelikož touto metodou zkoumání trvanlivostí nástroje není možné pokaždé dosáhnout opotřebení přesně 0,5 mm, byla skutečná trvanlivost nástroje určena z grafu závislosti opotřebení břitů nástroje na čase



Obr. 44 Zjednodušený graf závislosti opotřebení na čase, který sloužil jako pomůcka k určení trvanlivosti.

Během experimentu bylo vyzkoušeno 7 procesních prostředí. 5 kapalin od firmy Paramo, a.s, čistá voda a nakonec bylo obráběno za sucha. Pro každé procesní prostředí se provádělo 5 měření a každé měření se provádělo s novou břitovou destičkou.

## **4.5 Metodika zkoumání drsnosti povrchu při soustružení nerezové oceli na univerzálním soustruhu SU-50**

### **Použité přístroje a pomůcky**

- Soustruh SU-5
- Drsnoměr Mitutoyo SV-2000
- Ručení refraktometr Brix 0,18% ATC
- Stolní PC se softwarem Surfpack

### **4.5.1 Příprava měření**

Pro zkoumání drsnosti povrchu po soustružení byl kvůli obtížné manipulaci použit jiný obrobek o jiném materiálu, konkrétně ČSN 17 240, který měl menší rozměry a nebyla potřeba jeho další rozměrová úprava. Stačilo jej tedy pouze upnout do sklíčidla soustruhu SU-50.

K měření se namíchaly a používaly stejné procesní kapaliny jako u měření trvanlivosti nástroje. Nebylo jich však potřeba takové množství ale jen cca 2 litry od každé kapaliny. Samotný přívod kapaliny do místa řezu byl proveden speciálním chladicím zařízením.

### **4.5.2 Postup měření drsnosti obrobené plochy**

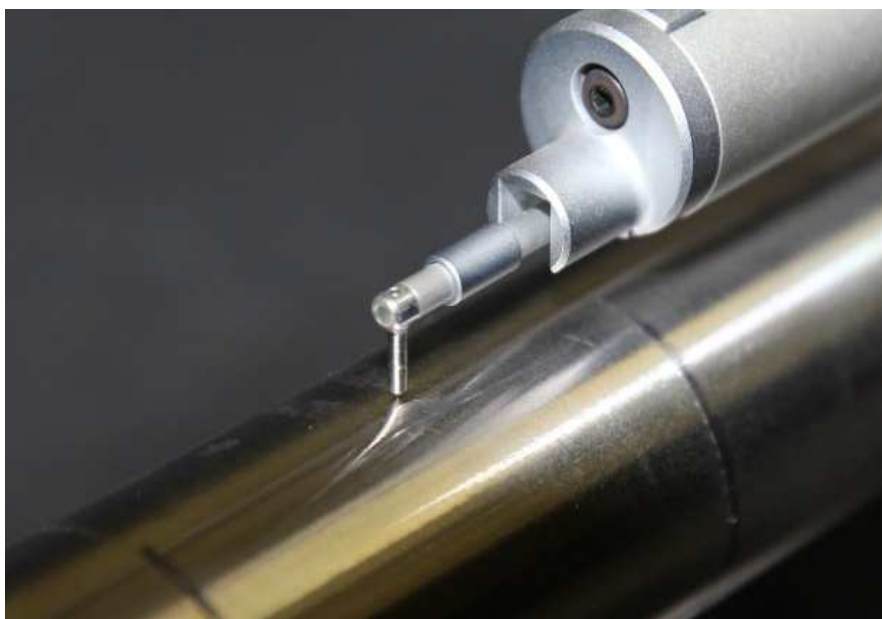
Nejprve bylo nutné stanovit nové vhodné řezné podmínky. Ty museli zaručit, aby trvanlivost bříty nástroje neovlivnila zkoumanou drsnost povrchu. Řezná rychlost byla stanovena na hodnotu  $v = 28,58 \text{ m/min}$ . a otáčky na  $n = 350 \text{ ot/min}$ . Posuv a hloubka záběru zůstali stejné jako v případě obrábění při měření trvanlivosti. Konkrétně tedy Posuv  $f = 1 \text{ mm/ot}$ . a hloubka záběru  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ .

Řezná rychlost [m/min]	Otáčky [ot/min]	Posuv [mm/ot]	Hloubka záběru [mm]
28,58	350	0,1	0,5

Tab. 6 Řezné podmínky pro obrábění při měření drsnosti obrobeného povrchu

Při samotném obrábění se nejdříve prvním přejetím srovnal průměr obrobku. Jednotlivá procesní prostředí tvořená kapalinami a vzduchem měli vymezenou délku obrábění cca 35 mm, během kterého bylo nutné sledovat a zaručit čistící efekt procesního média aby nedošlo k poškození obrobeného povrchu odcházející třískou.

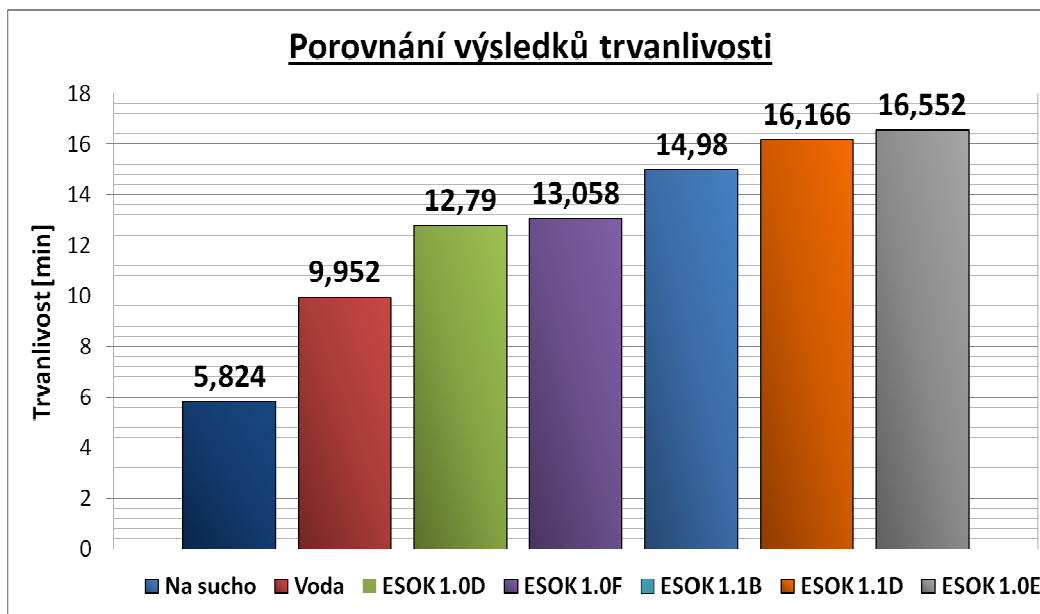
Měření jednotlivých povrchů probíhalo v laboratoři KOM FS TUL na drsnoměru MITUTOYO SV-2000 (Obr. 35). Z drsnoměru byly naměřené hodnoty převedeny na číselné na stolním PC v softwaru Surfpak. Každá plocha obrobku byla měřena 10x aby se zaručila určující hodnota. Z měřených hodnot se pro naše účely používaly hodnoty  $R_a$  (střední aritmetická úchylka profilu),  $R_z$  (vzdálenost mezi několika nejvyššími a nejnižšími body profilu) a  $C_{tp50}$  (nosný podíl profilu, který značí hloubku, ve které je podíl materiálu a vzduchu 1:1). Naměřené hodnoty byly následně vyexportovány a zpracovány do formy tabulek a grafů.



Obr. 45 Měření drsnosti přístrojem MITUTOYO SV-2000

## 5. POROVNÁNÍ VLIVU EKOLOGICKÝCH PROCESNÍCH KAPALIN NA TRVANLIVOSTI VBD A DRSNOST POVRCHU PŘI SOUSTRUŽENÍ NEREZOVÉ OCELI V LABORATOŘI KOM FS TUL

### 5.1 Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na trvanlivost VBD při soustružení nerezové oceli



Graf 1 Porovnání výsledků trvanlivosti VBD jednotlivých procesních kapalin

Prostředí	Na sucho	Voda	ESOK 1.0D	ESOK 1.0F	ESOK 1.1B	ESOK 1.1D	ESOK 1.0E
Trvanlivost [min]	5,824	9,952	12,79	13,058	14,98	16,166	16,552
Nárůst	-	70%	119%	124%	157%	178%	184%

Tab. 7 Procentuální vyjádření zvýšení trvanlivosti nástroje

Z Grafu 1 a Tab. 7 vyplývá, že použití procesních kapalin zvyšuje trvanlivost nástroje v rozmezí od 70% do 184%. Nejnižších hodnot trvanlivosti nástroje bylo dosaženo při obrábění za sucha konkrétně  $T = 5,8$  min. Naopak nejvyšší trvanlivosti  $T = 16,6$  min. bylo dosaženo použitím procesní kapaliny ESOK 1.0E, která zvýšila trvanlivost oproti obrábění bez kapaliny o 184%. Kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.0F vykazují podobné hodnoty, konkrétně kapalina ESOK 1.0D dosáhla trvanlivosti  $T = 12,8$  min. a kapalina ESOK 1.0F měla trvanlivost  $T = 13,1$  min. Rozdíl mezi nimi je tedy pouhých 5%. Obdobně jsou na tom kapaliny ESOK 1.1D a ESOK 1.0E, kde

ESOK 1.1D měla trvanlivost  $T = 16,2$  min. a ESOK 1.E měla trvanlivost  $T=16,6$ min. Rozdíl mezi nimi je tedy 6%. Kapalina 1.1B dosáhla trvanlivosti  $T=15$  min a prokázala tak zlepšení o 157% oproti obrábění za sucha.

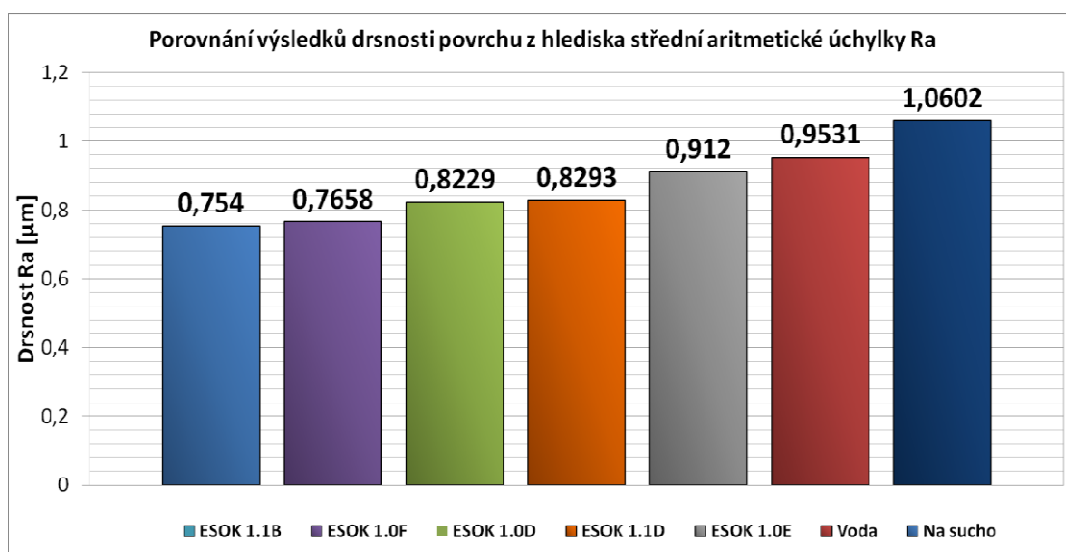
### **Závěr:**

Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 481 bez procesní kapaliny bylo dosaženo trvanlivost  $T = 5,8$  min. Při použití vody jako procesního prostředí byla prodloužena trvanlivost o 70% na hodnotu trvanlivosti  $T = 10$  min. Největší trvanlivosti nástroje bylo dosaženo, při použití kapalin ESOK 1.0E , ESOK 1.1D a ESOK 1.1B, které měly o 22 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0F a ESOK 1.0D. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázali zlepšení o 58% a oproti obrábění na sucho 171%

## 5.2 Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli

V této části bude následovat zhodnocení vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu z hlediska parametru Ra, Rz a nosného podílu  $C_{TP50}$ .

### 5.2.1 Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu z hlediska střední aritmetické úchylky profilu - Ra



Graf 2 Porovnání výsledků drsnosti povrchu z hlediska střední aritmetické úchylky profilu - Ra

Prostředí	Na sucho	Voda	ESOK 1.0E	ESOK 1.1D	ESOK 1.0D	ESOK 1.0F	ESOK 1.1B
Průměrná drsnost Ra [μm]	1,0602	0,9531	0,912	0,8293	0,8229	0,7658	0,754
Nárůst	-	11%	16%	28%	29%	38%	41%

Tab. 8 Procentuální vyjádření zlepšení drsnosti povrchu z hlediska střední aritmetické úchylky drsnosti – Ra

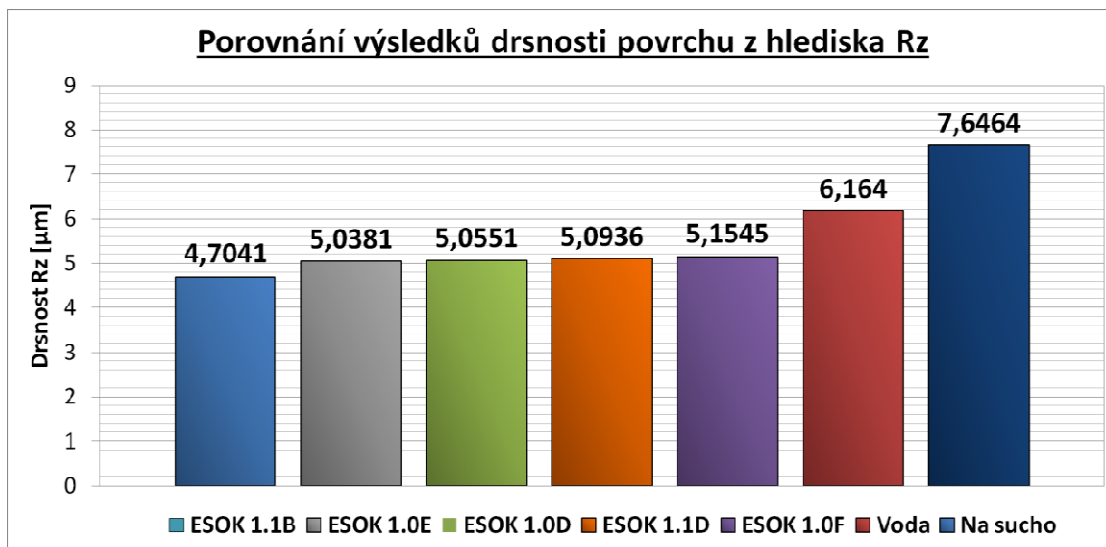
Z Grafu 2 a Tab. 8 vyplývá, že použití procesních kapalin má za následek zlepšení drsnosti povrchu z hlediska střední aritmetické úchylky až o 41%. Největší drsnost povrchu byla dosažena při obrábění za sucha, přičemž průměrná naměřená drsnost za sucha byla  $Ra = 1,06 \mu m$ . Nejmenší drsnosti bylo dosaženo při použití kapalin ESOK 1.1B a ESOK 1.0F. Průměrná drsnost u kapaliny ESOK 1.1B byla  $Ra = 0,754 \mu m$  a u kapaliny ESOK 1.0F byla  $Ra = 0,766 \mu m$ , přinesly tak zlepšení oproti obrábění za sucha o 41% a 38%. Procesní kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.1D

dosahovali téměř stejných hodnot. Průměrná drsnost při jejich použití byla  $R_a=0,8261\mu\text{m}$  a zlepšili tak drsnost v průměru o 28,5%. Nejhuře z měřených procesních kapalin na tom byla kapalina ESOK 1.0E, která přinesla rozdíl v drsnosti od obrábění vodou pouhých 5% a dosahovala průměrné hodnoty  $R_a=0,912\mu\text{m}$ .

#### **Závěr:**

Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla drsnost povrchu z hlediska  $R_a = 1,0602\mu\text{m}$ . Při použití vody jako procesního média se zlepšila drsnost o 11% na hodnotu  $R_a = 0,9531\mu\text{m}$ . Nejmenší drsnosti povrchu obrobené plochy bylo dosaženo při použití kapalin ESOK 1.1B a ESOK 1.0F, které měly o 9 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.1D. Vůči obráběním s použitím vody jako procesního media a kapalině ESOK 1.0E prokázali zlepšení o 20% a oproti obrábění na sucho 40%.

### 5.2.2 Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na drsnost povrchu z hlediska vzdálenosti mezi 5-ti nejvyššími a nejnižšími body profilu-Rz



Graf 3 Porovnání výsledků drsnosti povrchu z hlediska vzdálenosti mezi 5-ti nejvyššími a nejnižšími body profilu - Rz

Prostředí	Na sucho	Voda	ESOK 1.0F	ESOK 1.1D	ESOK 1.0D	ESOK 1.0E	ESOK 1.1B
Průměrná drsnost Rz [ $\mu\text{m}$ ]	7,6464	6,164	5,1545	5,0936	5,0551	5,0381	4,7041
Nárůst	-	24%	48%	50%	51%	52%	63%

Tab. 9 Procentuální vyjádření zlepšení drsnosti povrchu z hlediska vzdálenosti mezi 5-ti nejvyššími a nejnižšími body profilu – Rz

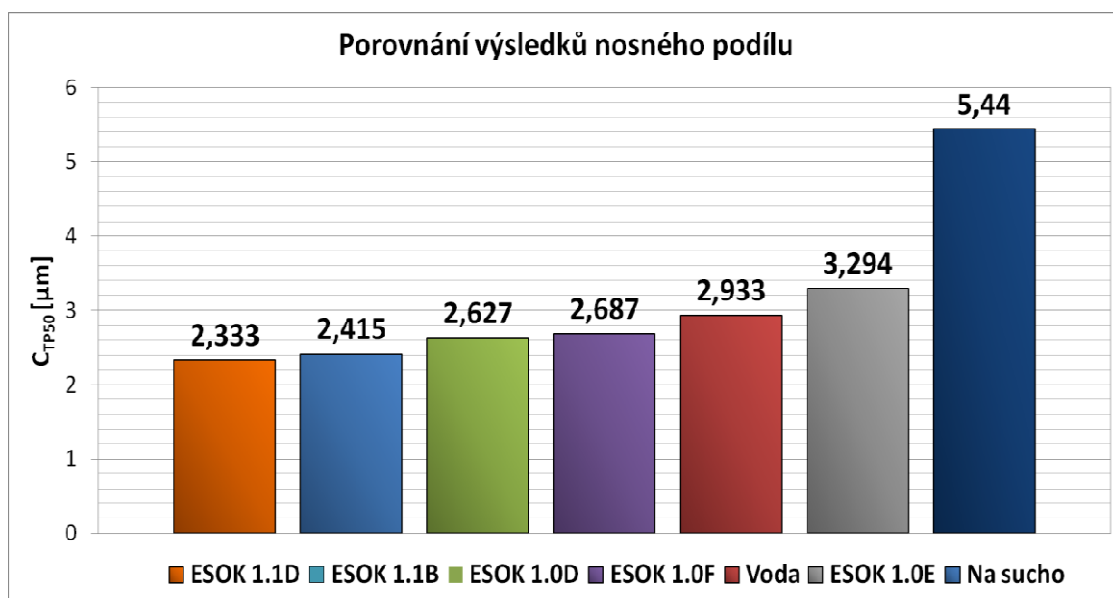
Z Grafu 3 a Tab. 9 vyplývá, že použití procesních kapalin má za následek zlepšení drsnosti povrchu z hlediska Rz až o 63%. Nejhorší drsnost povrchu byla dosažena při obrábění za sucha, konkrétně  $Rz = 7,65 \mu\text{m}$ . Naopak nejmenší drsnosti bylo dosaženo při použití kapaliny ESOK 1.1B, jejíž průměrná hodnota byla  $Rz = 5,381 \mu\text{m}$  a přinesla tak zlepšení o 63% oproti obrábění za sucha. Kapaliny ESOK 1.0E, ESOK 1.0D a ESOK 1.1D dosahovali podobných výsledků. Jejich dosažená průměrná drsnost byla  $Rz = 5,062 \mu\text{m}$  a zlepšení oproti obrábění za sucha 51%. Nejhůře na tom ze zkoumaných procesních kapalin byla kromě vody kapalina ESOK 1.0F, která přinesla zlepšení jen o 48% oproti obrábění s použitím vody jako procesního média.



## Závěr:

Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla drsnost povrchu z hlediska  $R_z = 7,6464\mu\text{m}$ . Při použití vody jako procesního média se zlepšila drsnost povrchu o 24% na hodnotu  $R_z = 6,164\mu\text{m}$ . Nejmenší drsnosti obrobené plochy bylo dosaženo při použití kapaliny ESOK 1.1B, která měla téměř o 13 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0E, ESOK 1.0D, ESOK 1.1D a ESOK 1.0F, jež dosahovali velice podobných výsledků. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázala zlepšení o 39% a oproti obrábění na sucho 63%.

### 5.2.3 Porovnání vlivu jednotlivých procesních kapalin na podíl nosného profilu $C_{TP50}$



Graf 4 Porovnání výsledků nosného podílu  $C_{TP50}$

Prostředí	Na sucho	ESOK 1.0E	Voda	ESOK 1.0F	ESOK 1.0D	ESOK 1.1B	ESOK 1.1D
Nosný podíl [ $\mu\text{m}$ ]	5,44	3,294	2,933	2,687	2,627	2,415	2,333
Nárůst	-	65%	85%	102%	107%	125%	133%

Tab. 10 Procentuální vyjádření zlepšení nosného podílu  $C_{TP50}$

Z grafu 4 a Tab. 10 vyplývá, že použití procesních kapalin má za následek zlepšení nosného podílu  $C_{TP50}$  až o 133%. Největší hodnoty nosného podílu bylo dosaženo při obrábění za sucha, konkrétně  $C_{TP50}=5,44 \mu\text{m}$ . Naopak nejmenší hodnoty nosného podílu bylo dosaženo při použití kapaliny ESOK 1.1D, jejíž průměrná hodnota byla  $C_{TP50}=2,333\mu\text{m}$  a přinesla tak zlepšení drsnosti o 133% oproti obrábění za sucha. Kapalina ESOK 1.1B dosahovala průměrné hodnoty  $C_{TP50}=2,415 \mu\text{m}$  a zlepšila tak nosný podíl oproti obrábění za sucha o 125%. Kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.0F dosahovali podobných výsledků, jejich průměrná hodnota nosného podílu byla  $C_{TP50}=2,657 \mu\text{m}$  a zlepšili tak nosný podíl o 105%. Z měření dále plyne, že kapalina ESOK 1.0E dosahovala horších výsledků nosného podílu než při obrábění s použitím vody jako procesního média. Hodnota jejího průměrného nosného podílu byla  $C_{TP50}=3,294 \mu\text{m}$  a zlepšení prokázala oproti obrábění za sucha o 65%.

#### **Závěr:**

Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla hodnota nosného podílu  $C_{TP50}= 5,44 \mu\text{m}$ . Při použití procesní kapaliny ESOK 1.0E se zlepšil nosný podíl o 65%. Při použití vody jako procesního média došlo ke zlepšení hodnoty nosného podílu o 85%. Nejmenšího nosného podílu bylo dosaženo použitím procesních kapalin ESOK 1.1D a ESOK 1.1B, které dosahovali zlepšení o 25% více než kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.0F, jež dosahovali podobných výsledků. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázali zlepšení o 44% a oproti obrábění na sucho v průměru o 129%.

## 6. ANALÝZA LABORATORNÍCH VÝSLEDKŮ; VYVOZENÍ ZÁVĚRŮ

V první části této bakalářské práce bylo úkolem zjistit míru vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje při soustružení nerezové oceli. Úkolem bylo vybrat takovou procesní kapalinu, která bude mít prokazatelně nejlepší vliv na trvanlivost nástroje při soustružení.

- Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 481 bez procesní kapaliny bylo dosaženo trvanlivost  $T = 5,8$  min. Při použití vody jako procesního prostředí byla prodloužena trvanlivost o 70% na hodnotu trvanlivosti  $T = 10$  min. Největší trvanlivosti nástroje bylo dosaženo, při použití kapalin ESOK 1.0E , ESOK 1.1D a ESOK 1.1B, které měly o 22 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0F a ESOK 1.0D. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázali zlepšení o 58% a oproti obrábění na sucho 171%

V druhé části práce jsme se věnovali vlivu procesních kapalin na drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli z hlediska  $R_a$ ,  $R_z$  a nosného podílu. Úkolem bylo vybrat takovou procesní kapalinu, které bude mít prokazatelně nejlepší vliv na drsnost obrobené plochy. Byly tedy vyvozeny následující tři závěry z každého hlediska zvlášť a jeden dodatkový, ve kterém je zvolena nejlepší kapalina z hlediska drsnosti povrchu:

- Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla drsnost povrchu z hlediska  $R_a = 1,0602 \mu\text{m}$ . Při použití vody jako procesního média se zlepšila drsnost o 11% na hodnotu  $R_a = 0,9531 \mu\text{m}$ . Nejmenší drsnosti povrchu obrobené plochy bylo dosaženo při použití kapalin ESOK 1.1B a ESOK 1.0F, které měly o 9 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.1D. Vůči obráběním s použitím vody jako procesního media a kapalině ESOK 1.0E prokázali zlepšení o 20% a oproti obrábění na sucho 40%.

- Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla drsnost povrchu z hlediska  $R_z = 7,6464 \mu\text{m}$ . Při použití vody jako procesního média se zlepšila drsnost povrchu o 24% na hodnotu  $R_z = 6,164 \mu\text{m}$ . Nejmenší drsnosti obrobené plochy bylo dosaženo při použití kapaliny ESOK 1.1B, která měla téměř o 13 % lepší výsledky než kapaliny ESOK 1.0E, ESOK 1.0D, ESOK 1.1D a ESOK 1.0F, jež dosahovali velice podobných výsledků. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázala zlepšení o 39% a oproti obrábění na sucho 63%.
- Při soustružení nerezové oceli ČSN 17 240 bez procesní kapaliny byla hodnota nosného podílu  $C_{TP50} = 5,44 \mu\text{m}$ . Při použití procesní kapaliny ESOK 1.0E se zlepšil nosný podíl o 65%. Při použití vody jako procesního média došlo ke zlepšení hodnoty nosného podílu o 85%. Nejmenšího nosného podílu bylo dosaženo použitím procesních kapalin ESOK 1.1D a ESOK 1.1B, které dosahovali zlepšení o 25% více než kapaliny ESOK 1.0D a ESOK 1.0F, jež dosahovali podobných výsledků. Vůči obrábění s použitím vody jako procesního média prokázali zlepšení o 44% a oproti obrábění na sucho v průměru o 129%.
- Z těchto tří závěrů vyplývá, že prokazatelně nejlepší kapalinou z hlediska jejího vlivu na drsnost povrchu je ESOK 1.1B.
- Prokazatelně nejlepšího vlivu na trvanlivost nástroje a drsnost obrobené plochy dokazovala kapalina ESOK 1.1B a na základě našich měření společnost PARAMO doporučila kapalinu ESOK 1.1B pro zkoušky v průmyslu.

### Seznam použité literatury:

- [1] HUMÁR, A., *Technologie obrábění 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno 2003, VUT Brno. 138 s.
- [2] JURKO, J., *Opotrebenie rezných nástrojov*, Prešov, 2005, ISBN 80-8073-255-8
- [3] SANDVIK Coromant: *Příručka obrábění*. Praha : Scientia s.r.o. Praha, 1997, 910 s. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [4] PrametTools, s.r.o., *Katalog obrábění - Soustružení 2012*. Ke stažení na WWW: <http://www.pramet.com/indexc1b6.html>
- [5] ČEP, R.: *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky při přerušovaném řezu : doktorská disertační práce*. VŠB-TU Ostrava, 2005
- [6] HUMÁR, A., *Technologie I – technologie obrábění – syllabus*. Brno: VUT Brno, 2003. K dispozici na adrese <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [7] Mechanické vlastnosti materiálů. K dispozici online na adrese <http://www.pronton.cz/nerez.html>
- [8] M. PECHÁČEK: *Vliv řezných kapalin na výsledky obrábění: bakalářská práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009
- [9] ISO 3685 : 1990. *Tool Life Testing With Single Point Turning Tools*. 1990
- [10] KOČMAN, PROKOP: *Technologie výroby II, řešené příklady*, VUT Brno 2002
- [11] JERSÁK, J., *Základní pojmy, podstata technologie obrábění – přednáška č. 2*. Technická univerzita v Liberci – Katedra obrábění a montáže

- [12] ČEP R., PETRŮ J., *Experimentální metody v obrábění*, učební text, VŠB 2011  
k dispozici na adrese  
[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_komplet\\_finish.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf)
- [13] KOČMAN, K, PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: AKADEMICKÉ  
NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. Brno, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
- [14] J. LOLEK: *Procesní kapaliny používané na CNC strojích: bakalářská práce*,  
VUT Brno 2012
- [15] Vyšlo v MM : 2007 / 5, 23.05.2007 v rubrice Trendy / Průmyslové kapaliny,  
Strana 54
- [16] Vyšlo v MM : 2011 / 7, 28.06.2011 v rubrice Trendy / Průmyslové kapaliny,  
Strana 26
- [17] MANG, T; DRESEL, W. *Lubricant and lubrication*. 2007.  
Weinheim:Wileyvch, January 2007. 848 s. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [18] SANDVIK COROMANT, SANDVIKEN, SWEDEN. *Turning titanium –  
developments in application technology*. Editor Christer Richt,  
Metalworking World
- [19] z článku *MQL Explained: Articles and Video*, k dispozici na adrese  
<http://www.mmsonline.com/blog/post/mql-explained-articles-and-video>
- [20] Vyšlo v MM : 2008 / 6, 11.06.2008 v rubrice Výroba / Obrábění, Strana 54
- [21] MŠMT. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní  
výrobní technologie. Moderní metody testování řezných nástrojů*.  
6. výukový modul Inovované učební texty – přednášky.
- [22] Vyšlo v MM: 28.08.2012 v sekci Technické novinky >> Třískové obrábění s  
aerosolovým suchým mazáním bez nárůstu tepla

- [23] BUMBÁLEK, B., *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti plochy pro její funkci*. Vysoké učení technické v Brně
- [24] KŘÍŽ, A., *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*, přednáška z tepelného zpracování, Západočeská Univerzita v Plzni
- [25] KOLNEROVÁ, M., *Povrchy plechů - Mikrogeometrie povrchu povlaku plechů*, studijní materiály, Technická Univerzita Liberec
- [26] KARÁSEK, J. *Drsnost povrchu*. Technická univerzita v Liberci, katedra obrábění a montáže, 2001. K dispozici na [http://www.kom.tul.cz/soubory/mm\\_pod.zip](http://www.kom.tul.cz/soubory/mm_pod.zip).
- [27] ŠŇUPÁREK, P., MAREK, M., *Technická dokumentace – drsnost povrchu*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky elektrických strojů a přístrojů – KAT 453
- [28] Kontrola a měření ve strojírenství, Střední průmyslová škola v Teplicích, Úloha měření drsnosti povrchu. K dispozici na adrese [http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA\\_3.1.4\\_MERENI\\_DRSNOSTI\\_POVRCHU.pdf](http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.4_MERENI_DRSNOSTI_POVRCHU.pdf)
- [29] FalconMachineTools CO., LTD., Multi-Function CNC Lathe FCL-2140/2160/2180, specifikace CNC soustruhu CHEVALIER FCL-2140. K dispozici na adrese [http://www.chevalier.com.tw/lather/pro\\_fcl1840.htm](http://www.chevalier.com.tw/lather/pro_fcl1840.htm)
- [30] PrametTools, s.r.o., *Katalog obrábění - Soustružení 2012*. Ke dispozici na adrese <http://www.pramet.com/indexc1b6.html>
- [31] Převodní a materiálová tabulka, k dispozici na adrese [http://www.marinfo.cz/foto/htm/technickenormy/csn\\_din.html](http://www.marinfo.cz/foto/htm/technickenormy/csn_din.html)
- [32] Vybrané oceli, vlastnosti a použití. K dispozici na adrese [http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli\\_pouziti](http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli_pouziti)